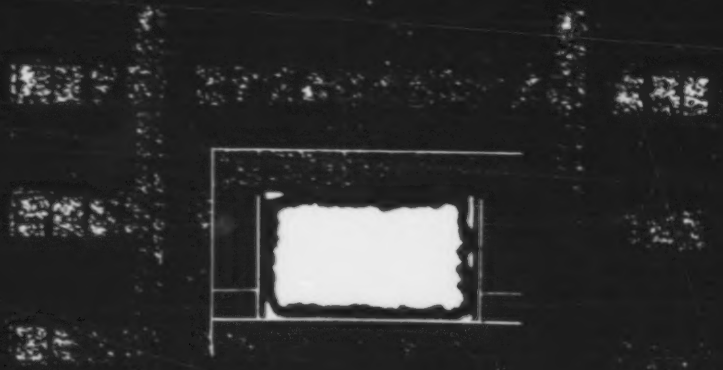
National Research Council Canada
Conseil national de recherches Canada

Institute for Research in Construction
Institut de recherche en construction

Designing for Fire Safety



PROCEEDINGS OF BUILDING SCIENCE INSIGHT '87

Canada

88-04427/

BUILDING SCIENCE INSIGHT '87

Designing for Fire Safety

The Science and its Application to Building Codes

Price $6.00
NRCC 28277
ISSN 0835-653X
Ottawa, November 1987
© National Research Council Canada 1987

ERRATA

Designing for Fire Safety: Proceedings of Building Science Insight '87

p. 18

Second paragraph of left-hand column:

Please change "For some buildings either combustible or non-combustible construction is permitted. Generally, more stringent requirements are placed on other fire protection provisions (such as fire resistance ratings) in the combustible buildings to allow for equivalent levels of safety."

to "For some buildings either combustible or non-combustible construction is permitted. If the designer elects to use strictly noncombustible construction, however, the less stringent fire protection provisions (e.g. flame spread ratings) for combustible construction would still apply."

Contents

Foreword iii

Fire Loss Statistics and Regulatory Framework
J. K. Richardson, B.Sc., B.Eng., P.Eng. 1

Combustibility of Building Materials
J.R. Mehaffey, Ph.D. 9

Flammability of Building Materials and Fire Growth
J.R. Mehaffey, Ph.D. 21

Fire Compartmentation and Fire Resistance
G. C. Gosselin, M.Sc., M.B.A., P.Eng. 35

Structural Fire Protection – Predictive Methods
G. C. Gosselin, M.Sc., M.B.A., P.Eng. 45

Foreword

This publication contains the proceedings of Building Science Insight '87, a series of one-day seminars on fire safety design of buildings held in ten cities across Canada in the fall of 1987.

Many people, each with a specific interest and jurisdiction, take part in the process leading to the design of a fire-safe building. They include architects, structural engineers, fire protection consultants, building officials, and materials manufacturers. In Canada, the model for fire safety in buildings is the National Building Code (NBC) of Canada.

The NBC provides for a minimum level of fire safety by regulating the combustibility and flammability of building materials, and by requiring compartmentation and structural fire protection where warranted. These provisions, however, are only one way to achieve safety. Other measures may be used if they meet the intent of the NBC. Interpreting the intent of the Code requires a good knowledge of the underlying scientific principles. In the development of alternatives, designers and building officials are often hindered by a lack of guidance on the roles of the NBC provisions in achieving fire safety.

In recognition of this fact, the Institute for Research in Construction (IRC) devoted its 1987 Building Science Insight program to fire safety design of buildings. The specific objective was to explain the "science" behind the Code provisions so that attendees, upon returning to the workplace, would be better equipped to play their respective roles in the development of creative and workable design alternatives.

Building Science Insight '87 was the 27th since IRC began its annual series of seminar/workshops in the sixties. Seminars were held in Halifax, Moncton, Quebec City, Montreal, Ottawa, Toronto, Winnipeg, Saskatoon, Edmonton and Vancouver. About 1300 persons attended the sessions, which consisted of both lectures and workshops. The papers published herein were written by IRC researchers Ken Richardson, Jim Mehaffey and Guy Gosselin who, assisted in some cities by John Berndt, gave the presentations in English. Appreciation is extended to Jean-Luc Poulin, professor of architecture at the University of Montreal who, along with IRC's Luc Saint-Martin and Guy Gosselin, gave the lectures and conducted the workshops in French in Quebec City and Montreal.

In addition to the speakers, many other members of IRC contributed to the success of the seminars. They include Madeleine Fleury and Gail LeBlanc, registration; Fern Brisebois, travel and hotel arrangements; Linda Hayes and Anne-Marie Dorais, editing and publishing of the proceedings; Gilles Ouelet and Louise Coutu, translation; Nicole Paquette, text processing and layout of the proceedings; Don Hobbs, Christa Gaudert and Doug Scott, graphics and slides; Alan Dalgliesh, quality assurance; and Jim Gallagher, publicity. Technical coordinator was Guy Gosselin.

IRC has always considered technology transfer to be an important element of its programs. Seminars such as Insight are an effective medium because they allow instant dialogue between speakers and participants. IRC researchers value this interaction because it gives them a perspective of practical problems that cannot be obtained in the laboratory.

R.G. Turenne
Coordinator, Building Science Insight '87

Fire Loss Statistics and Regulatory Framework

J. Kenneth Richardson, B.Sc., B.Eng., P.Eng.

Introduction

The annual cost of fire in Canada is approximately $6 billion*, of which $2.5 billion is fire losses and $3.5 billion is the cost of fire protection. Approximately 600 persons die in fires every year, with many times that number of serious injuries. How effective are our present regulations and standards at addressing those costs and losses? Are there other means that could be more effective? Who is responsible for fire regulations and standards?

Life safety from fire in Canada is primarily mandated by building codes, based on the National Building Code of Canada.[1] Property protection from fire is usually an economic consideration, with the property insurance companies often establishing minimum standards, while building codes contain some provisions to prevent major conflagrations. The objectives of these codes and standards with respect to fire costs and losses are among the subjects explored in this paper.

One of the primary objectives of the National Building Code of Canada (NBCC) is to provide a minimum level of fire safety for building occupants. To achieve this objective in part, the Code specifies the use of construction materials that are noncombustible, exhibit low flame spread or that form a barrier to the spread of fire. These measures, representing part of an overall solution to improved fire safety, are the major topics to be addressed in Building Science Insight '87.

In demonstrating how fire safety is addressed in Canada and how other means could be utilized, this paper discusses:

- current fire statistics in light of present fire safety measures and Code provisions,
- the role of building regulations in achieving fire safety,
- the roles of the National Building Code of Canada, the Institute for Research in Construction, provincial building codes and the standards writing and certification organizations,
- a simplified fire safety systems approach, that provides an alternative means to achieving fire safety.

Canadian Fire Statistics

It is difficult to measure accurately how well Canadian building codes, property insurance standards and other fire safety measures succeed in meeting their objectives. The sole measure available on a national scale is the composite fire loss data.[2] These statistics cover fires in buildings of all ages, so it is difficult to focus only on those constructed to the provisions of the most recent codes and standards or using current fire safety measures. The statistics can, however, shed light on the existing situation and help put present day fire safety in focus.

As indicated previously, annual fire costs in Canada are approximately $6 billion, which represents 1.25% of the gross domestic product. These costs consist of fire losses (40%, made up of life losses and personal injuries, property losses and indirect losses) and fire protection (60%, made up of fire protection installed in buildings, fire services and other municipal services related to fire). It is in our national interest, therefore, to reduce our fire losses and optimize fire costs. Means to address both of these will be discussed.

* Does not include forest fire losses

Figure 1 shows unpublished information developed by the Fire Research Section of the Institute for Research in Construction (IRC), based on a survey of fires in the U.S. Similar ratios probably exist for Canadian fire losses. (This is the assumption on which the following analysis is based.) Fires that grew up to flashover (the point at which an entire space is involved in fire) and beyond, were closely examined and, using certain assumptions, it was determined that 78% of these fires remained in the preflashover stage.

The remaining 22% of the fires examined grew to the post-flashover stage. Of those, 32% were confined to the compartment of origin, i.e., the separated space in which the fire began. In all, 85% of the fires surveyed were contained to the compartment of fire origin, and only 15% of the total fires spread beyond that compartment. These fires that spread are considered to have the greatest potential for loss of life and property damage, since they could involve an entire large building.

Life and property losses in Canada over the most recent decade are shown in Figures 2 and 3. From the Canadian fire loss statistics, 85% of the fire deaths in 1984 occurred in residential occupancies but these occupancies accounted for only 37% of the property losses (Figures 4 and 5). Seventy-two per cent of the

Figure 1 Fire development survey results

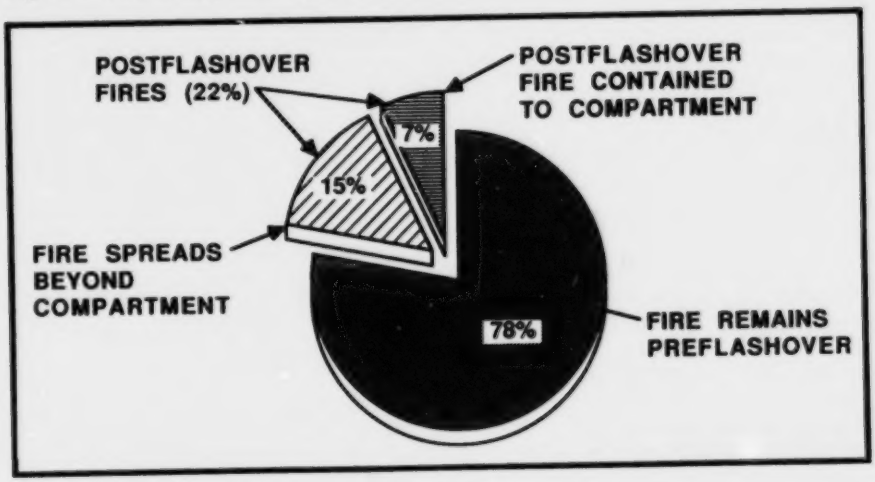
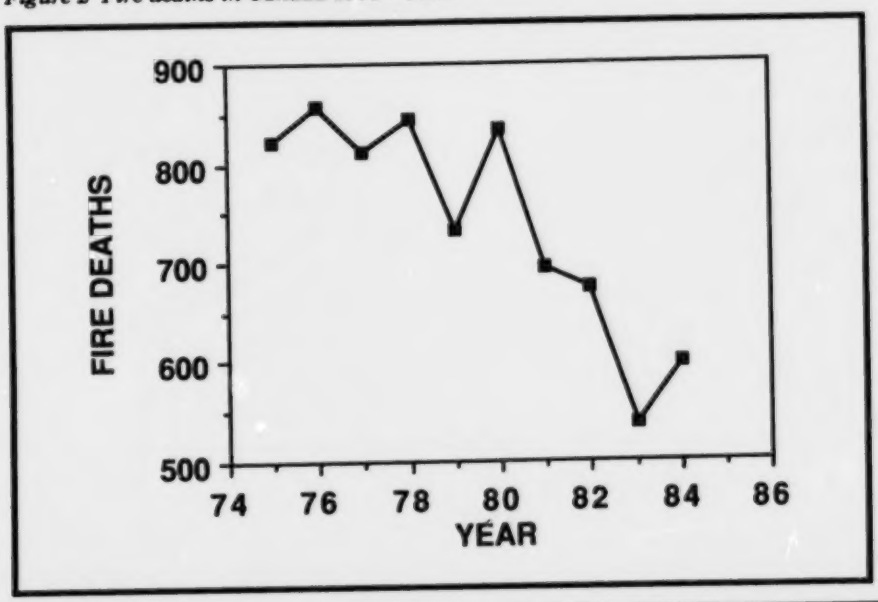


Figure 2 Fire deaths in Canada 1975 – 1984



residential fire deaths shown in Figure 4 occurred in one- and two-family dwellings and mobile homes. These dwellings typically contain only one fire compartment (since the rooms in a dwelling generally are not fire separated), so they may all be included in the 85% of fires illustrated in Figure 1 that were contained to the compartment of origin. In this type of occupancy, therefore, changes in fire safety measures that would have the greatest impact would probably be in the area of controlling the combustion process (such as safer furnishings and furniture) and suppressing the fire (as with residential sprinkler systems). A means to assess the impact of such changes will be discussed later. At this point it can be seen that the challenge to a thoughtful designer is to reduce the potential for fire losses and achieve optimum fire protection without increasing costs for fire protection.

Figure 3 Property losses in Canada 1975 – 1984

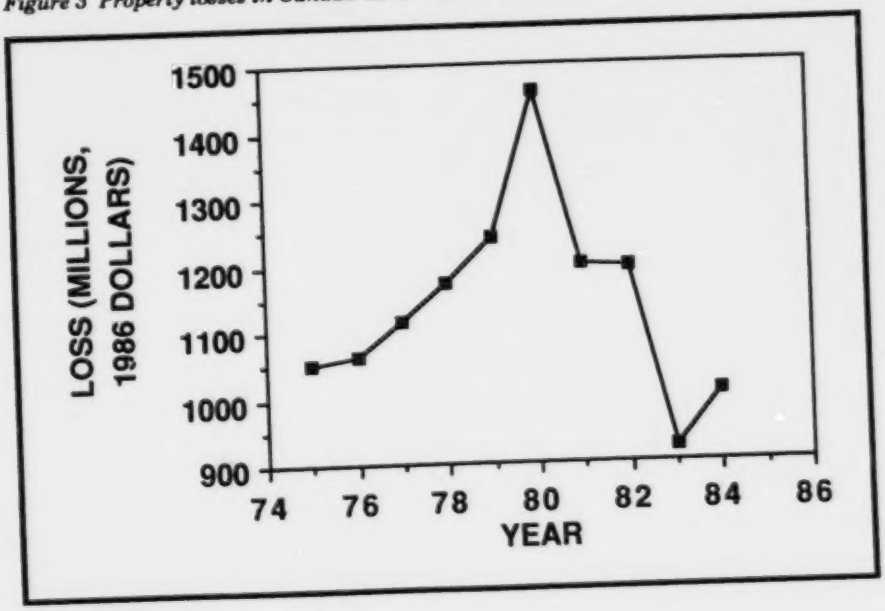
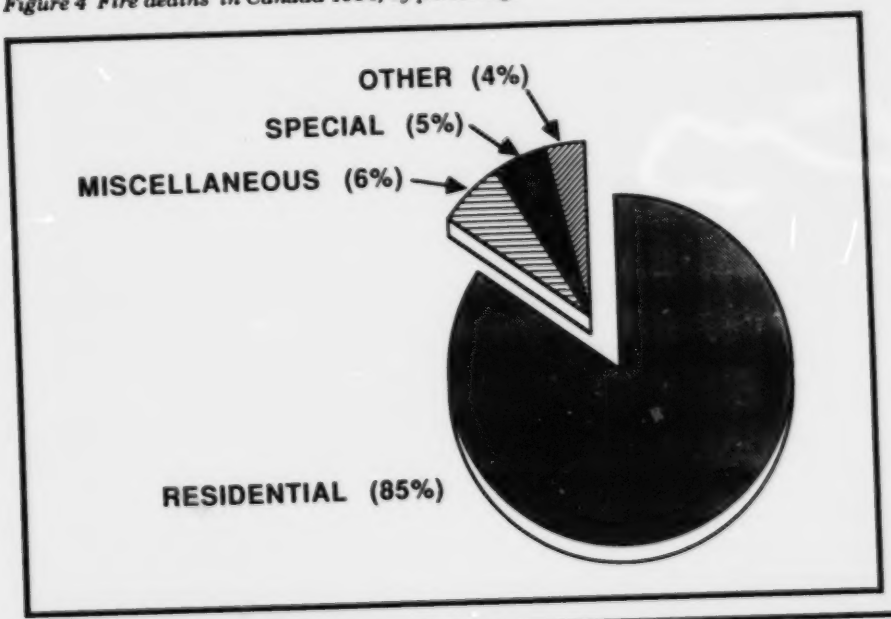


Figure 4 Fire deaths in Canada 1984, by percentage



Role of Codes in Fire Safety

Traditionally in Canada, architects and engineers have relied on building codes and insurance standards as the basis for fire safety design. With respect to life safety, building codes provide only one means of achieving a fire safety objective. Since codes are general in nature, often they do not address a specific fire problem. Such problems should be solved using a fire safety systems analysis, an example of which will be discussed later. Since codes are the typical present basis for fire safety design, it is important to understand their role in solving fire problems and their mechanism of addressing fire losses and fire costs.

Codes, such as the National Building Code of Canada, implicitly state how much fire safety is needed by specifying egress dimensions (from which egress time can be calculated), fire resistance, fire suppression and other elements such as fuel load limits. Taken together these represent the minimum level of fire safety that legislators are prepared to accept for building construction in Canada. Designers must, therefore, meet this level of safety for those issues addressed by building codes (in the NBCC these are primarily life safety).

Code Equivalencies

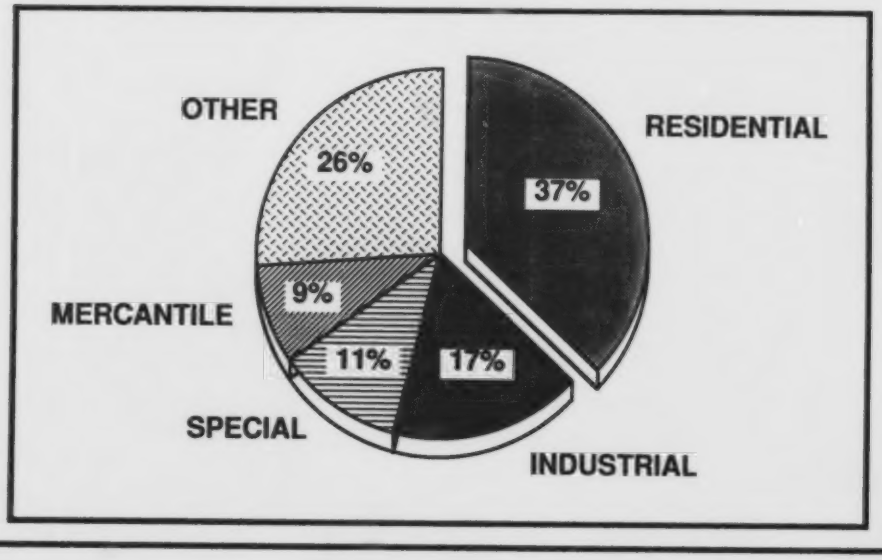
Knowing or being able to determine the level of safety intended by the code permits designers to develop solutions which may differ from the specific code provisions, but which provide the same level of safety. Such solutions are called equivalents and are often used in large or complex buildings, where meeting the letter of the code is difficult or impossible. It is the designer's responsibility to demonstrate equivalency and the code agency's responsibility to assess it. This is often done through the presentation and evaluation of a fire safety systems analysis addressing the specific issue. Examples of these equivalent solutions will be presented in other papers in this seminar.

Codes and Standards in Canada

Before discussing a means of developing equivalent solutions, it is important to understand the basis and history of Canadian Codes, in particular the NBCC. Prior to 1941, most large municipalities in Canada passed building bylaws based on British and American Codes. Then the Government of Canada asked the Department of Finance and the National Research Council to develop model building regulations which could be used uniformly in all areas of the country. This request was principally in response to a need for uniform housing regulations, which were the responsibility of the Department of Finance. The result of that work was the 1941 edition of the National Building Code of Canada.

The responsibility for the National Building Code of Canada was given to the National Research Council in 1948. Nine editions have been published by the National Research Council, the most recent in 1985. The NBCC is presently published on a five-year cycle, with interim amendments issued as needed.

Figure 5 Property losses in Canada 1984, by percentage



After the National Research Council was given responsibility for maintaining and updating the Building Code, the Associate Committee on the National Building Code (ACNBC) was formally established as the body responsible for this task. Its mandate was to develop model regulations with reference to public health, fire protection and structural sufficiency. This is often interpreted to mean life safety only, however, certain property protection provisions are included. To assist the ACNBC in technical matters, technical committees or standing committees were established, consisting of persons knowledgeable in a specific technical area. In the field of fire safety, there are three such standing committees; one each on fire protection, occupancy and fire performance ratings. The first two are responsible for Part 3 of the NBCC (Use and Occupancy), while the third is responsible for Chapter 2 of the Supplement to the NBCC (Fire Performance Ratings).

In general, the ACNBC establishes the policies for the code committees (as articulated in the ACNBC Policies and Procedures[3]), coordinates committee activities, and gives final approval of all changes to the Code and its associated documents. The standing committees are responsible for the technical content of their particular portions of the documents. Membership on all code committees is broadly based, with balanced representation from industry, regulatory agencies and other users.

The staff of the Institute for Research in Construction of the National Research Council provides technical and secretarial support at the direction of the ACNBC. Technical problems revealed through the process of formulating or revising the Code are referred to IRC research sections for study, in order to make available to the committees the most up-to-date information on building technology and safety. The Fire Research Section has carried out many such studies and much of its research work is reflected in NBCC requirements. One point that should be noted is that staff of the Institute serve only as technical advisors or secretaries to the committees; they do not vote on any committee action.

The NBCC, as a model document, has no power of law until it is adopted by a provincial or territorial government. Since building regulations are the purview of the provinces, it is they who give the NBCC the force of law by adopting it as a provincial building regulation. Some provinces write their own regulations using the NBCC as a basis; some adopt it by direct reference, while other provinces provide legislation that enables municipalities to adopt it as a municipal bylaw.

The level of detail needed to ensure fire safety in buildings is enormous. For this reason, the NBCC makes reference to hundreds of standards, some of which are codes in themselves, such as the Canadian Electrical Code, Part 1.[4] These standards, which ensure a minimum level of safety in specific technical areas, are generally developed by Canadian standards-writing organizations using committees balanced in a manner similar to those of the ACNBC. In Canada, the major standards-writing organizations in the area of fire are the Canadian Standards Association (CSA), Underwriters' Laboratories of Canada (ULC), and the Canadian Gas Association (CGA). The standards of the National Fire Protection Association (NFPA) are also used extensively in the fire safety field.

While the NBCC mandates specific performance by the use of a code requirement or by reference to a standard, it does not require that such products or systems be certified (listed or labelled). Certification organizations provide a service to code users and regulators by certifying that products bearing their marks have been tested and are in conformance with various codes or standards. While certification is not required as proof of performance, it is often used to ensure that the minimum standards have been met.

Fire Safety Systems Analysis

As previously indicated, a designer faced with a problem related to fire or life safety is often tempted to seek out codes or standards as the sole solution. When those solutions do not provide the specific answers, or provide answers that are not consistent with other aspects of the project, such as aesthetics, costs or function, a fire safety systems analysis is the recommended means to solving the problem.

Building designers and fire protection engineers may use fire safety systems analyses to solve non-typical fire problems. Code officials often use such analyses to evaluate equivalent solutions that have been submitted for approval. Code writers may also use them in the future to assess the impact and economic viability of proposed code changes.

The term 'fire safety systems analysis' describes a methodical, step-by-step approach to solving a fire safety problem. The approach illustrated here is based on the NFPA Fire Safety Concepts Tree, which is documented in the Fire Protection Handbook[5] and the NFPA Standard 550, Fire Safety Concepts Tree[6]. It is limited, however, to an elementary treatment and illustrates how the BSI '87 papers relate to the tree and how codes impact on the application of such analyses.

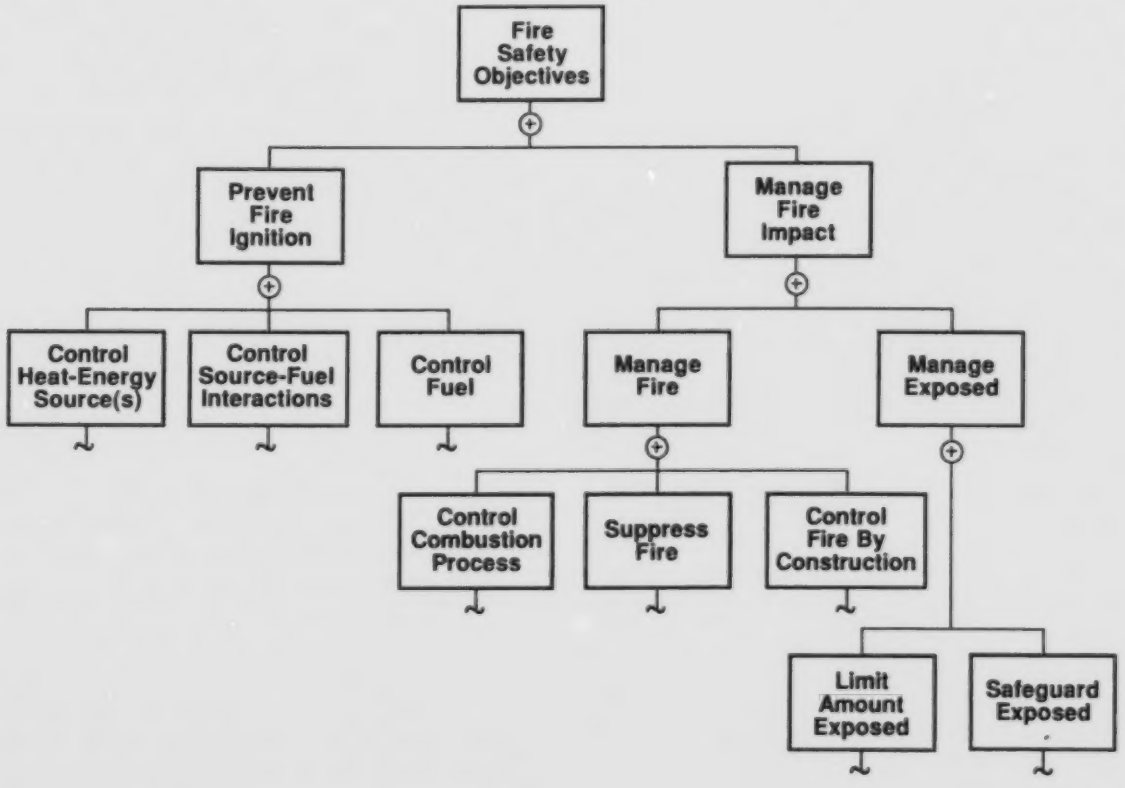
In this paper, hard data on a specific fire problem is not used and it is often difficult to obtain. The Fire Research Section of IRC is working with the Footscray Institute of Technology (Australia) to develop a quantitative hazard assessment model that incorporates the concepts of the National Building Code of Canada and Canadian fire experience. Additionally, the Ontario Ministry of Housing is co-sponsoring with IRC and the other provinces a contract to create a code assessment framework that can be used to evaluate all requirements of Canadian codes, not just those related to fire. These models will be available in the coming years and should prove to be powerful tools for the assessment of fire hazards and fire safety measures.

Principal Branches

The following sections describe one fire safety systems analysis method. Others are available, but this is the one most often used in North America. The principal branches of the Fire Safety Concepts Tree[6] are illustrated in Figure 6. The + symbol means that one branch or the other will achieve the objective of the box above it. In order to use the tree system, the general topics in the boxes are replaced by the parameters of the problem under consideration. In building design, the fire safety objectives illustrated in the top box should describe the degree to which a building must protect its occupants, contents, operations and neighbours. For example, the objective in life safety could be that the occupants be safeguarded against intolerable or untenable fire conditions for a certain time, while the objective for contents may be that only so much property be lost. Thus the fire safety objectives will vary depending on the situation. Those for a hospital will differ from those for an automated warehouse.

One of the basic objectives used in a fire safety systems analysis in which life safety is a factor is the time for occupants to escape to a safe location. While not specifically defined in the NBCC, the time for egress is implicit in the numerous requirements for egress routes; from these, egress times can be calculated. This time for egress provides the principal basis for assessing a building's fire safety measures in terms of occupant protection, and will differ by occupancy; for example, a nursing home will probably require greater time for egress than a retail store of the same size.

Figure 6 Principal branches of the Fire Safety Concepts Tree



In dealing specifically with property protection objectives, the minimum level of fire safety is usually dictated by the economics of the situation, except in those cases where the property to be protected provides an essential service. Obviously property insurance premiums and the cost of fire protection measures are important economic considerations.

At the first level of the tree, the fire safety objectives can be achieved by preventing fire ignition or, if a fire does occur, by managing its impact. The prevention of fire ignition is essentially the responsibility of a fire prevention code, such as the National Fire Code of Canada[7] and requires continuous monitoring for success. The major players pursuing this form of fire safety are the fire departments and public information agencies with their fire prevention programs. These programs are effective to a point, however, none of them provides assurance that a fire will not occur. To achieve the fire safety objective, therefore, the management of fire impact assumes a significant role.

For either of the branches to satisfy the objective on its own, it must be 100% effective. Obviously, in the real world, such levels are seldom achieved. In recognition of this, most fire safety systems analyses rely on a combination of the various measures or on redundant measures within a certain branch. The objective is, however, to achieve 100% efficiency and reliability using whatever measures are necessary.

The management of fire impact can be satisfied by either managing the fire or managing the 'exposed' (again assuming 100% reliability of each branch). The exposed could be building occupants or property, or an adjacent building. Management of the exposed is generally met either by moving the affected people or property to a safe area or by defending them in place. It encompasses elements such as egress and exit design, and areas of refuge, which are essential to achieving the fire safety objective pertaining to life safety, but are not the subject of this seminar.

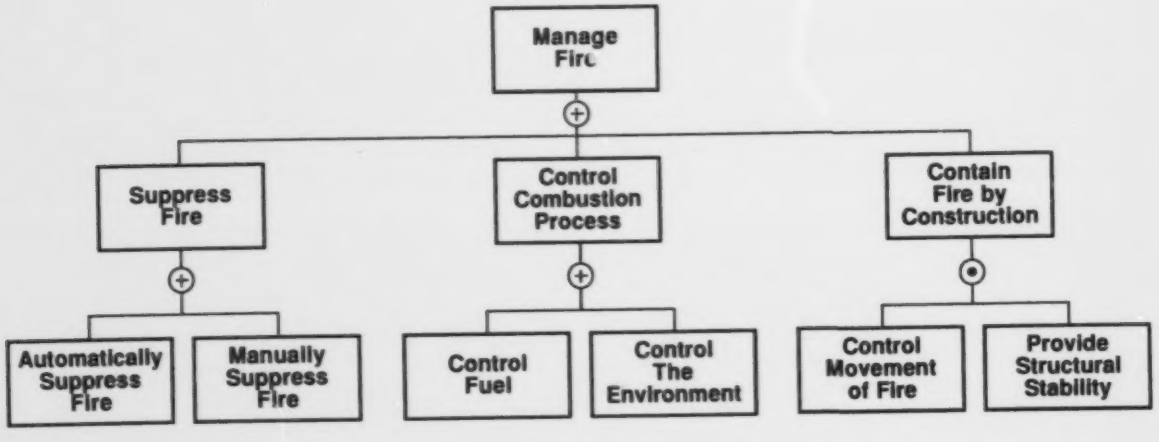
Management of Fire

This seminar will concentrate on the management of fire. This sub-branch of the Fire Safety Concepts Tree is expanded in Figure 7. This objective can be met by suppressing the fire, controlling the combustion process, or containing the fire by construction.

While it will not be addressed in this seminar, fire suppression is an often-used technique that meets the objective of managing the fire. Perhaps the most common means of fire suppression is the automatic sprinkler, and building codes often rely on this to provide safety for building occupants. As can be seen in Figure 7, the suppression of fire can be satisfied by either automatic means (such as automatic sprinklers or automatic halon systems) or manual means (such as portable extinguishers or fire hoses). Either of these will achieve the objective, assuming 100% reliability, but both must be preceded by some means of fire detection.

The second and third presentations of this seminar deal with the combustibility and flammability of building materials and fire growth. The information contained in those lectures will provide means to control the combustion process. Controlling this process addresses either

Figure 7 Manage Fire sub-branch of Fire Safety Concepts Tree



the fuel or the environment in which the fuel is located. Non-combustibility of building materials, controlling the ignition process, reducing flame spread and fire growth potential are some of the issues to be considered in this area. The simplest way to meet this objective would be to have virtually noncombustible materials or to create an environment where continued combustion is difficult. North American lifestyles and economic considerations usually preclude these simple solutions, so the presentations will demonstrate other techniques that can be used to control the combustion process. Often this element is used in conjunction with the other two to achieve the management of fire.

The fourth and fifth presentations, which address the containment of fire by construction, are directed at fire compartmentation and structural fire protection. To meet this objective, both fire compartmentation and structural stability under fire conditions must be present, as indicated by the • sign on the fire safety concepts tree. The control of fire by construction is a well documented subject and has been a traditional means used in building codes to achieve fire safety. This seminar will review the need for compartmentation, address the material properties which influence thermal transmission and other compartmentation features, and demonstrate means to predict the fire resistance of building elements. Again, this element is often used in conjunction with the other two to achieve the management of fire objective.

Concluding Remarks

Building Codes and fire prevention codes in Canada provide generalized solutions which have been reasonably effective in the reduction of fire losses and fire costs, however, Canadian fire statistics indicate that there is room for improvement. The most effective means to solve a fire problem is through the use of a fire safety systems analysis which addresses the specific issues and limitations involved. Such analyses usually involve the evaluation of various fire safety measures and the resulting solutions often incorporate a variety of these measures in attempting to achieve 100% reliability.

Improvements in fire safety will have the greatest impact on loss of life in the area of residential one- and two-family dwellings and mobile homes. These improvements must be specifically addressed to those buildings and the lifestyles of their occupants by the use of a fire safety systems analysis, the results of which would form a basis for changes to building codes. This is the real challenge to designers, regulatory officials and code writers.

References

1. National Building Code of Canada, 1985. Associate Committee on the National Building Code. National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC23174.

2. Fire Losses in Canada, Annual Report 1984, 1986. Office of the Fire Commissioner of Canada, Ottawa.

3. ACNBC Policies and Procedures 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 24378.

4. Canadian Electrical Code, Part 1, 1986. Canadian Standards Association. Rexdale, Ontario, CSA C22.1-1986.

5. Coté, A.E. and J.L. Linville (eds.), 1986. Fire Protection Handbook, 16th Edition. Systems Concepts for Building Firesafety, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 7-10 to 7-14.

6. Guide to the Firesafety Concepts Tree, 1986. National Fire Protection Association, Quincy, MA, NFPA 550 - 1986.

7. National Fire Code of Canada, 1985. Associate Committee on the National Fire Code. National Research Council of Canada. Ottawa, NRCC 23175.

Combustibility of Building Materials

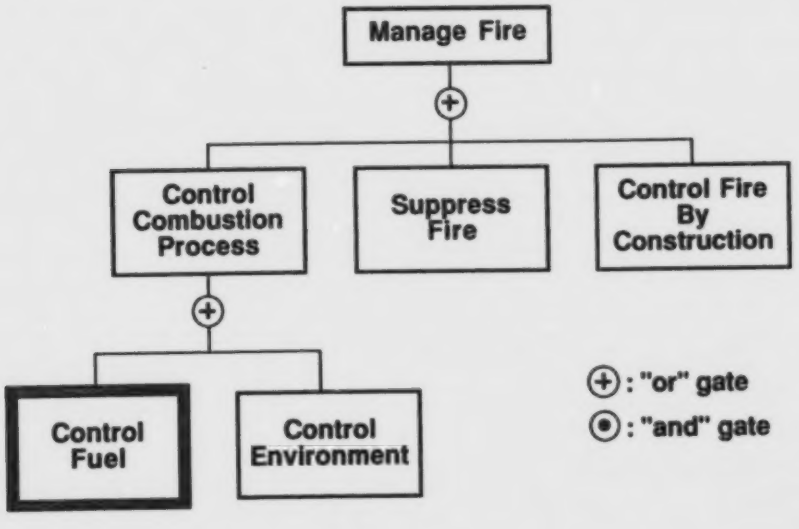
J.R. Mehaffey, Ph.D.

Introduction

Building codes and other regulations often put restrictions on the ignitability and combustibility of building materials and contents, as well as on the proper uses of potential ignition sources. If fires are difficult to ignite, remain localized once ignited or, at worst, spread and burn slowly, then building occupants are likely to have sufficient time to escape. It must be recognized though, that it is not practical to specify the exclusive use of noncombustible building materials or noncombustible contents.

In this paper a review of test procedures aimed at segregating building materials into combustible and noncombustible categories is presented, as well as an explanation of the intent of requirements for noncombustible construction contained in the National Building Code of Canada (NBC).[1] Whether a building must be of noncombustible construction or not depends on the building size, the hazards it contains, the mobility and level of alertness of occupants, how many streets it faces, and whether or not it is sprinklered. Controlling the combustible content of buildings (or controlling the fuel) in this manner plays a significant role in the Manage Fire sub-branch of the Fire Safety Concept Tree (Figure 1).

Figure 1 Control Fuel element in Manage Fire sub-branch of Fire Safety Concept Tree



The paper concludes with a discussion on the need for the development of a more general test method for evaluating the degree of combustibility of building materials.

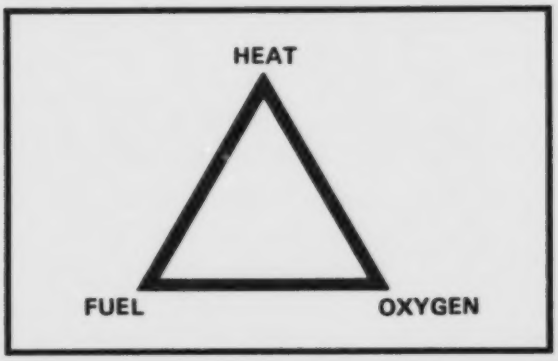
The Basic Chemical and Physical Nature of Fire

A chemist envisions a fire as a complex series of chemical reactions involving the oxidation of fuel, usually containing carbon. Physically, of course, a fire is characterized by visible flame, heat and smoke.

The fire triangle, depicted in Figure 2, illustrates the three components required for a fire: fuel, oxygen and heat. The fire triangle can be looked upon as a physicist's descriptive model of fire. Its utility becomes evident when considering extinguishment (suppression), which can be achieved by isolating one of the three components from the other two. Fire can be suppressed by removing heat (with water spray, for example), by removing the fuel (turning off the flow of fuel in a Bunsen burner, for example), or by removing the oxygen (by smothering the fire with a fire blanket).

This physical representation of fire is useful, but the fact that chemical reactions are also needed to keep the fire going cannot be ignored. The basic components of fire then should also include the uninhibited chain reactions within the flame and at the fuel surface, as depicted in Figure 3. This allows for the possibility of a fourth extinguishment (suppression) technique: that of inhibiting the chain reaction (quenching the flame) with fire retardant chemicals. Halogens, such as chlorine and bromine (found in halons), are elements that act in this fashion.

Figure 2 Fire triangle – three components required for a fire

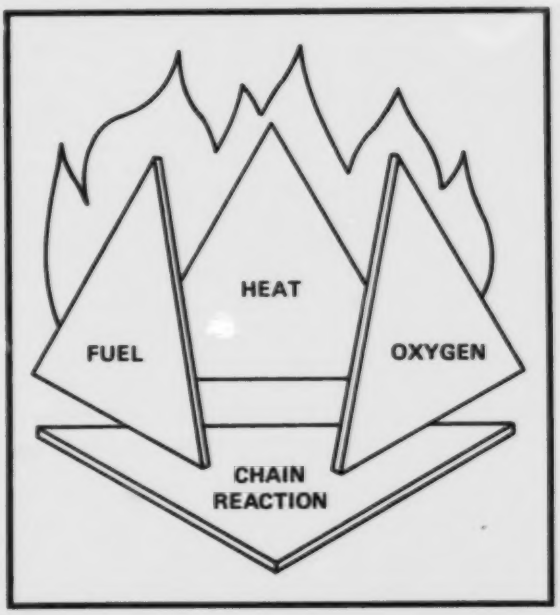


Of course there is more to a fire than the presence or absence of these three or four components. Fire is a complex phenomenon involving chemical kinetics, fluid mechanics, heat transfer, and thermodynamics. The process of ignition of a solid, for instance, can be described as follows.

Consider an external heat source (an overheated wire) in contact with a combustible material (wood, for example). The temperature at the surface of the wood increases steadily to 100°C, at which point water is driven off as steam. As the temperature continues to increase, the wood starts to undergo pyrolysis; that is, it starts to decompose into volatiles (vapors) and char. The volatiles, being hotter and hence less dense than the surrounding air, rise and mix with the air.

At around 300°C, this mixture of volatiles and air can ignite, producing a flame. Some of the heat generated by the flame escapes with the rising hot gases, but a portion of it is 'fed back' to the fuel (by radiant, convective or conductive heat transfer), causing its temperature to increase further and pyrolysis to proceed at a greater rate. In turn, the flame grows. If the heat feedback to the fuel is sufficient to cause it to pyrolyze and burn by itself, one has 'sustained flaming combustion'. The original ignition source is no longer needed (Figure 4).

Figure 3 Fire tetrahedron – chemical reactions required to keep a fire going



Char formation, which occurs only in some materials, can play an important role in the burning process. In its position between the flame and the burning object, it can act as a shield, slowing down heat transfer to virgin fuel and in turn decreasing the rate of burning or of heat release. Fires do not burn well on the top surface of a piece of wood.

On the other hand, in geometries such as that depicted in Figure 5, air drawn into the flame can play directly on the hot char. The char can undergo oxidation (it glows) and the heat released can cause pyrolysis of the virgin fuel below the char. Sticks of wood burn well if ignited from below.

Products of combustion rise above the flame in the form of smoke and heat. Smoke consists of airborne solids (soot), liquid droplets, and gases, some of which may be toxic. Of the toxic gases produced, carbon monoxide is certainly the most prominent; however, hydrogen cyanide and hydrogen chloride may also be produced when polyurethane or polyvinyl chloride is burning. Being quite buoyant, smoke and the toxic gases within it can migrate to areas fairly remote from the fire, presenting the primary threat to occupants of a building. It is this that makes them the leading cause of fire deaths.

Flaming combustion is easily differentiated from another type of combustion called smouldering. Essentially, smouldering combustion is typified by low temperatures and a very slow rate of combustion. It takes place when the volatiles liberated from the surface of the fuel are not hot enough or in sufficient quantity to ignite, but sufficient heat is generated to keep the fuel pyrolyzing. The lack of buoyant forces means that little air is drawn over the fuel surface, limiting the rate of combustion. Such products as loose-fill cellulose insulation, fibreboard and, of course, cigarettes, have a propensity to smoulder for a considerable period of time with only a small ignition source.

Solid fuels or combustible materials can be categorized in a number of ways. For instance, a distinction is made between charring and noncharring materials, based on the capacity of the material to form a char as it pyrolyzes. Most materials with a high cellulosic content, such as wood, produce a char residue; however, so does hydrocarbon-based polyvinyl chloride and certain thermosetting resins, such as phenolic and polyisocyanurate foams. Other materials, such as polystyrene, produce little or no char when they burn.

Another differentiation is made between synthetic polymers according to their propensity to soften and melt (deform) at a temperature below that required for thermal decomposition or ignition to occur. When this characteristic prevails, the polymer is called a thermoplastic. When involved in a fire, such materials can have quite an effect on its behavior, due to falling droplets or the spread of a burning pool of molten polymer on the ground. Polymers that

Figure 4 Sustained flaming combustion

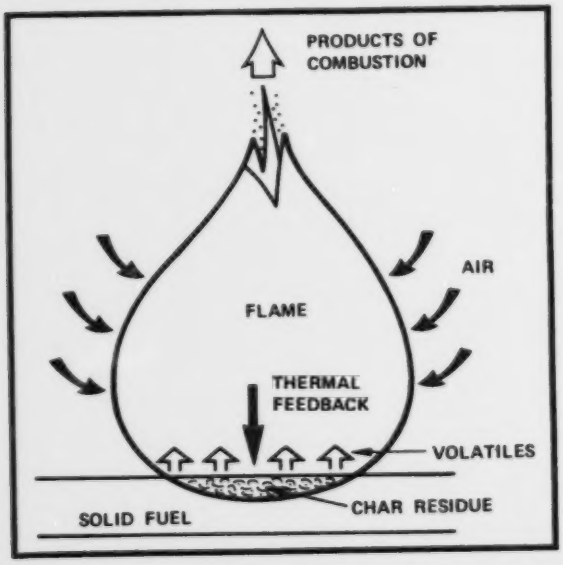
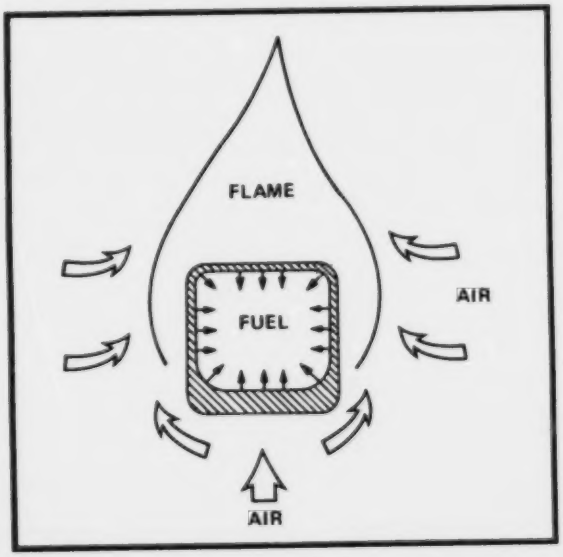


Figure 5 Flaming combustion of a char-forming solid



have a cross-linked molecular structure will not melt when heated. Instead, at a sufficiently high temperature, they will decompose, giving off volatiles directly from the solid, often leaving behind a carbonaceous residue, much as wood does. These polymers are called thermosets or thermosetting resins.

Table 1 lists a few examples of thermoplastic and thermosetting polymers. Rigid polyurethane foams commonly used as building insulation in exterior walls or over roof decks, and flexible polyurethane used for cushioning in upholstered furniture, are generally thermosets, although the extensive use of plasticizers may make certain polyurethane foams behave as thermoplastics. Phenolics are thermosetting materials used in circuit breakers.

Table 1 Some Synthetic Polymers

Thermoplastics (melting)	Thermosetting (non-melting)
Polyethylene	Epoxy
Polymethylene	Polyester (fibre or glass reinforced)
Polymethylmethacrylate (PMMA)	Polyisocyanurate
Polypropylene	Polyurethane (rigid or flexible)
Polystyrene	Phenolics
Polyvinyl chloride (PVC)	

Thermoplastics find varied applications in the marketplace. Polyvinyl chloride (PVC) is used mainly for piping and conduit, polystyrene for foam insulation, polyethylene as a vapor barrier and PMMA, also known as Plexiglass*, for glazing.

Ignition Sources in Building Fires

Obviously, a sound fire protection measure would be to limit the number of fires by limiting the number of ignitions. Building fires usually start with the ignition of a single item, which involves two factors: the ignition source and the first item ignited.

Statistics on ignition sources in building and vehicle fires are collected annually by the Fire Commissioner of Canada. Fire losses by source of ignition for the year 1984 are summarized in Table 2.[2] The most common ignition sources include cooking, heating, and electrical distribution equipment, and smoker's materials or open flame.The hazards associated with such ignition sources have been known for some time. It is certainly not practical to eliminate these sources. Instead, standards and codes have been developed to mitigate the hazards. Some of these are summarized in Table 3.

*Trademark

Table 2 Fire Losses by Source of Ignition - 1984

Source of Ignition (Igniting Object)	No. of Fires	Dollar Loss	Injuries	Deaths
No igniting object (e.g. Lightning)	450	11 829 531	20	2
Cooking equipment	8 406	43 355 794	692	48
Heating equipment	7 915	87 320 198	285	61
Appliances and equipment	2 605	21 432 925	78	6
Electrical Dist. equipment	7 640	108 671 994	281	33
Other electrical equipment	1 671	16 997 569	67	7
Smoker's material	5 399	42 090 030	724	181
Match, lighter, lamp candle, taper	2 218	24 939 216	135	17
Cutting torch, welding equip., varied torches	933	21 620 019	93	2
Hot ashes, embers	536	7 153 197	12	1
Smoker's materials or 'Open' Flame	5 248	43 499 032	149	13
Exposure to fires in other buildings	2 150	19 273 978	24	8
Miscellaneous	15 203	171 286 013	453	31
Undetermined	10 356	310 009 575	1 090	188
TOTAL	70 730	929 479 253	4 103	598

Table 3 Standards or Codes regulating ignition sources

Ignition Source	Standards and Codes
Cooking equipment	NBC - installation requirements
	CSA - product specifications
	CGA - product specifications
Heating equipment	NBC - installation requirements
	CSA - product specifications
	CGA - product specifications
Appliances and equipment	CSA - product specifications
Electrical distribution equipment	CEC - installation requirements
	CSA - product specifications
Open flames	NFC - permitted practices
Welding and cutting equipment	NFC - permitted practices

NBC - National Building Code of Canada
CSA - Canadian Standards Association
CGA - Canadian Gas Association
CEC - Canadian Electrical Code
NFC - National Fire Code of Canada

The First Item Ignited

Ignition requires both an ignition source and a combustible fuel. As with ignition sources, it is impractical to simply eliminate combustibles from buildings. Instead one attempts to control their ignitability or combustibility.

In a recent study conducted by Consumer and Corporate Affairs Canada,[3] provincial statistics were reviewed to establish which materials are most likely to be the first item ignited in building or vehicle fires. The results of the study are summarized in Table 4.

Table 4 Materials first ignited in building or vehicle fires

	Percent of Total			
Material First Ignited	Incidents	Dollar Loss	Injuries	Deaths
Flammable or combustible liquids	18.7	11.1	23.6	7.3
Furniture, furnishings	10.4	7.2	19.8	24.5
Structural components and finish materials	10.3	13.6	7.4	10.0
Electrical insulation	9.8	3.2	4.0	1.2
Wood, paper products	8.2	11.5	8.6	4.7
Garbage, trash	4.1	0.7	2.3	0.5
Clothing, textiles	3.4	1.4	3.4	6.8
Chemicals, plastics, metals	2.4	1.4	1.8	0.2
Agricultural, forest products	2.1	4.7	1.3	1.3
Flammable gases	1.9	1.5	4.3	0.6
Others	0.4	0.3	0.1	0.1
Unclassified	22.3	39.3	22.9	36.1
Default	6.2	4.0	0.5	6.7
Total	100.2	99.9	100.0	100.0

By far the most common materials first ignited are flammable or combustible liquids, such as gasoline, cooking oil, or fat. The hazard represented by such materials is well known. Provisions for safe handling and storage of some of these liquids are contained in Part 4 of the 1985 edition of the National Fire Code of Canada,[4] and are beyond the scope of this seminar.

The second most common class of materials first ignited is furniture and furnishings, such as upholstered furniture, bedding, and mattresses. Whereas 10.4% of fires appear to involve furniture or furnishings as the first item ignited, these same fires amount for 24.5% of deaths and 19.8% of injuries. They are very hazardous fires indeed, as far as occupants are concerned. In recognition of this hazard, some classes of furniture or furnishings are regulated under the Hazardous Products Act. To be sold in Canada, mattresses must exhibit resistance to ignition by cigarettes,[5] curtains (and other textiles) to ignition by a small flame,[6] and carpets to ignition by a methenamine tablet (slightly more intense than a cigarette).[7] Recently, provisions have been made under the Act to encourage manufacturers of upholstered furniture to test their products for resistance to ignition by cigarettes.

The third most common class of materials first ignited are building elements, such as structural components and finish materials. They account for 10.3% of fires, 13.6% of dollar losses, 7.4% of injuries, and 10.0% of deaths. They represent a significant cause for concern and are the principal subject of the rest of this paper.

The Need for Noncombustible Building Materials

Building materials are generally classified within the National Building Code of Canada as either combustible or noncombustible. It is important to distinguish between the ignitabilily and the combustibility of a material. Its ignitability is its ability to be ignited; its combustibility its ability to be ignited and to burn. Ignitability is not addressed directly in the NBC. It is not clear to what ignition sources building materials must demonstrate ignition resistance. The combustibility of building products is an issue regulated by the NBC.

Faced with serious fire problems, the code committees decided years ago that some buildings, particularly high buildings, or those with large areas, needed to be built of noncombustible materials to effect a so-called 'fireproof construction'. Such construction would help provide sufficient time for building occupants to evacuate, and would make fire fighters' tasks more manageable, by inhibiting fire spread through the building, particularly through concealed spaces. In addition, fireproof construction, together with adequate fire resistance provisions, is intended to ensure that the building will not sustain excessive damage or collapse before evacuation and fire fighting are completed. Finally, fire spread to other buildings should be abated. In Canada, during the 1800's and 1900's, such fire spread often led to conflagrations which destroyed large sections of towns or cities.

The Noncombustibility Test

A building material is classified as noncombustible if it meets the acceptance criteria contained in CAN4-S114-M80, Standard Method of Test for Determination of Non-Combustibility in Building Materials.[8] The test method is intended to assess the performance of elementary building materials only: it does not apply to materials with a decorative or protective coating, or impregnation, or those built up of laminations of dissimilar materials.

The test is conducted in a small electrically-heated furnace, shown in Figure 6. Temperatures in the furnace are determined by a controlling thermocouple, used to stabilize the furnace temperature prior to the test, and an indicating thermocouple, used to measure any temperature rise during testing. A mirror is used to make visual observation through the gas vent during testing.

Test specimens have a base of 38 by 38 mm and a height of 50 mm. If the specimen is likely to disintegrate or melt during the test, it must be supported in a metal gauze or a thin sheet-metal dish. At least three specimens of the material must be tested. Before testing, these specimens must be dried at 60 ± 3°C for 24 to 48 hours and allowed to cool to room temperature in a dry atmosphere.

Before conducting the test, the furnace is heated to 750 ± 3°C at the controlling thermocouple and stabilized at that temperature to within 1°C for 15 minutes. The specimen is placed in the sample holder and inserted into the furnace from below. The test is continued for fifteen minutes, unless it becomes clear earlier that the specimen has failed the test.

Materials subjected to the test are considered to be noncombustible if:

- The mean of the maximum temperature rises (measured by the indicating thermocouple) for the three (or more) specimens during the test does not exceed 36°C;
- There is no flaming of any of the three (or more) specimens during the last 14 minutes and 30 seconds of the test;
- The maximum loss of mass of any of the three (or more) specimens during the test does not exceed 20%.

Note that the test is a pass/fail test; that is, the material is found to be either combustible or noncombustible. There is no measure of the degree of combustibility of the material provided.

Testing Laboratories

The following Canadian laboratories are equipped to perform the noncombustibility test:

- National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario
- Ontario Research Foundation, Mississauga, Ontario
- Underwriters' Laboratories of Canada, Scarborough, Ontario
- Warnock Hersey Professional Services Ltd., Coquitlam, B.C.

It is not common for NRC to conduct tests for product manufacturers, as this is generally understood to be the responsibility and livelihood of the commercial laboratories.

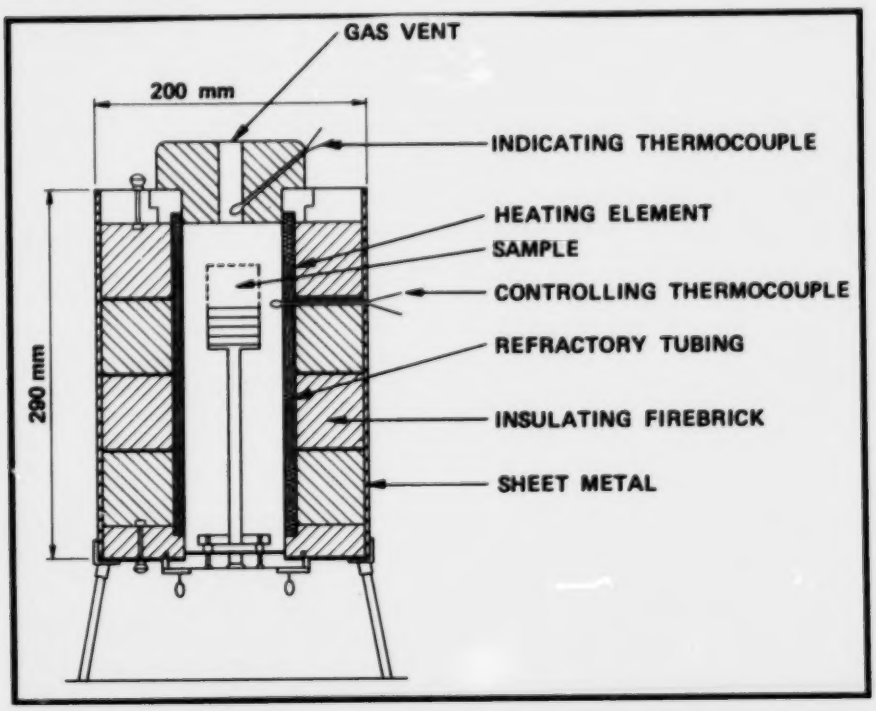
Product Testing

Data generated at NRC on the combustibility of Douglas fir, glass-fibre insulation, and aluminum are summarized in Figure 7. (In the testing of all products there is a drop in temperature (as recorded on the indicating thermocouple) at the start of the test, when the cool specimen is inserted into the hot furnace.)

The Douglas fir specimen is classified as combustible, as it failed all three acceptance criteria. The maximum temperature rise was 255°C; flaming was witnessed after the 30-second mark in the test (in fact, at times flames issued through the gas vent), and the mass loss was about 88%. It comes as no surprise to find that a wood product is classified as combustible.

The glass-fibre insulation is also classified as combustible. Although there was no flaming in the last 14.5 minutes of the test and the mass loss was only 7%, the temperature rise of 70°C exceeded the permitted value by a slight margin. It was the resins (binders) employed in this

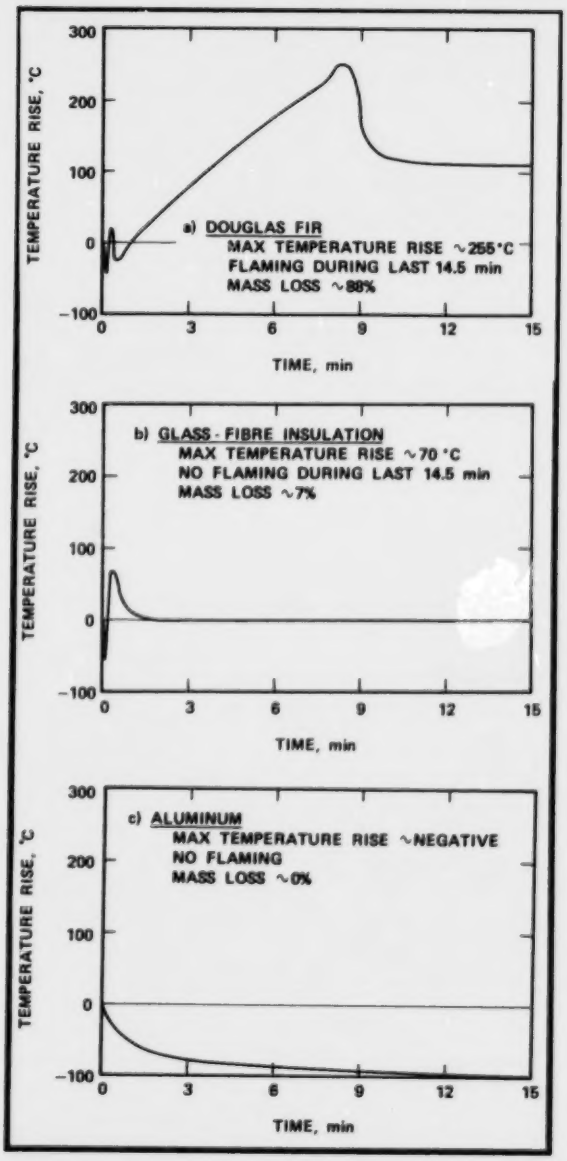
Figure 6 The non-combustibility test furnace



particular product which caused it to fail the test. There may be formulations of glass-fibre insulation which could pass this test.

It should come as no surprise that the solid aluminum specimen was found to be noncombustible. The specimen underwent some melting during the test and in this way absorbed heat from the furnace, causing relatively low temperatures to be recorded. There was no flaming and no mass loss during the test, as the molten aluminum was contained within a small dish.

Figure 7 Data from tests conducted in accordance with the noncombustibility test CAN-S114-M80. The Douglas fir and glass fibre specimens were found to be combustible; the aluminum is noncombustible.



The results of the test imply that aluminum building components will not undergo rapid oxidation in building fires. This is not to suggest that aluminum can never undergo rapid oxidation; under some conditions, generally quite different from those encountered in building fires, it can.[9]

After many years of testing, much has been learned about the test performance of common building materials. Some of that information is summarized in Chapter 2 in the Supplement to the National Building Code of Canada 1985.[10]

Most materials from animal or vegetable sources are classified as combustible by CAN4-S114. Wood, wood fibreboard, paper, felt made from animal or vegetable fibres, cork, plastics, asphalt and pitch would be classed as combustible. Materials that consist of combustible and noncombustible elements in combination, such as gypsum wallboard, will in many cases also be classed as combustible, unless the proportion of combustible elements is very small. Some mineral wool insulations with combustible binder, cinder concrete, cement and wood chips, and wood-fibred gypsum plaster would also be classed as combustible. The addition of a fire-retardant chemical is not usually sufficient to change a combustible product to a noncombustible product.

Noncombustible materials include brick, ceramic tile, concrete made from portland cement with noncombustible aggregate, asbestos cement, plaster made from gypsum with noncombustible aggregate, metals commonly used in buildings, glass, granite, sandstone, slate, limestone and marble.

Building Code Requirements

In addition to distinguishing between noncombustible and combustible materials, the present version of the NBC distinguishes between noncombustible construction and combustible construction. Since combustible construction is defined as construction that does not conform to the requirements for noncombustible construction, it is useful to first consider what is meant by noncombustible construction.

In noncombustible construction, building assemblies must be constructed of noncombustible materials, although, for practical reasons, some combustible elements are permitted. However, only those combustible elements considered not to represent an undue hazard and specifically

listed in Article 3.1.4.5. of the NBC may be used. For example, gypsum wallboard, although it is considered to be combustible itself, is permitted in noncombustible construction. Where combustible materials are permitted, additional restrictions are often placed on their use. For instance, combustible insulation is permitted, provided it meets certain flame-spread requirements and (in some cases) provided it is protected by a thermal barrier such as gypsum wallboard. For combustible interior finishes, restrictions are also placed on the thickness of the material.

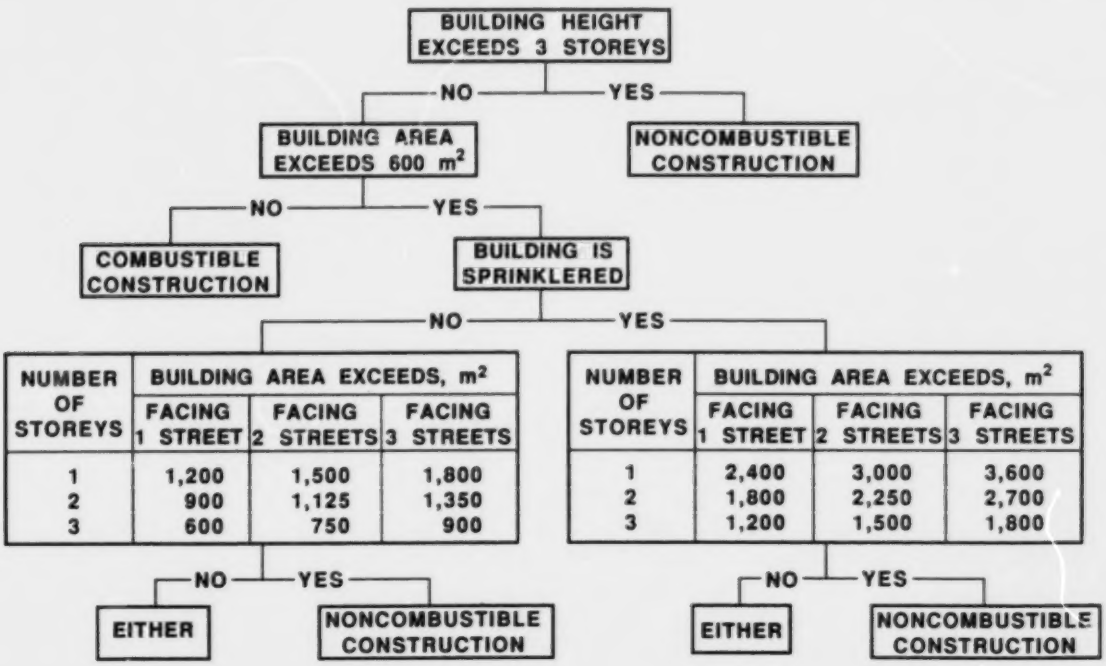
If an assembly constructed essentially of noncombustible material contains combustible elements not specifically permitted by the Code for noncombustible construction, the assembly falls within the category of combustible construction. Combustible construction is usually conventional wood frame or heavy timber.

The NBC requires that a building be of noncombustible construction if occupants could experience undue difficulty in evacuating in the event of a fire. Buildings over a certain height or area are required to be of noncombustible construction. The building area and building height limits below which the building is permitted to be of combustible construction depend on the major occupancy classification, the number of streets the building faces, and whether or not the building is sprinklered.

As an example, the pertinent requirements for residential buildings are summarized in Figure 8. Residential buildings which do not exceed three storeys in height or an area (single storey area) of 600 m^2 (such as one- and two-family dwellings and small apartment buildings), can be of combustible construction and can be built in accordance with Part 9 of the NBC. It is assumed that occupants have sufficient time to escape from a fire and that fire fighting capabilities are adequate to deal with fires in smaller buildings. All other residential buildings must be built in accordance with the more stringent requirements of Part 3 of the NBC.

Residential buildings which exceed three storeys in height must be of noncombustible construction. Those which do not exceed three storeys in height but do exceed 600 m^2 in building area may be required to be of noncombustible construction, depending upon whether the building is sprinklered, the number of storeys, the building area, and how many streets the building faces. The exact requirements are contained in Figure 8. Evacuation and fire fighting activi-

Figure 8 NBC requirements for noncombustible construction in residential buildings



NUMBER OF STOREYS	BUILDING AREA EXCEEDS, m^2		
	FACING 1 STREET	FACING 2 STREETS	FACING 3 STREETS
1	1,200	1,500	1,800
2	900	1,125	1,350
3	600	750	900

NUMBER OF STOREYS	BUILDING AREA EXCEEDS, m^2		
	FACING 1 STREET	FACING 2 STREETS	FACING 3 STREETS
1	2,400	3,000	3,600
2	1,800	2,250	2,700
3	1,200	1,500	1,800

ties are assumed to proceed more smoothly in sprinklered buildings, in buildings of fewer storeys and smaller area, and where there is direct access for firefighters from more sides.

For some buildings either combustible or noncombustible construction is permitted. Generally, more stringent requirements are placed on other fire protection provisions (such as fire resistance ratings) in the combustible buildings to allow for equivalent levels of safety.

This rather involved logic for residential buildings is in sharp contrast to the logic employed in establishing requirements for prisons. As the mobility of prisoners is generally restricted, evacuation in the case of fire is very much hampered. In addition, fire fighting activities are often hampered due to difficulty in gaining access to the fire. For these reasons all prisons are required to be of noncombustible construction, independently of such factors as building height, building area, or presence of sprinklers.

The Noncombustibility Test – Shortcomings

CAN4-S114 is a very severe test which is intended to determine whether a material is combustible or not. In this sense it is a pass/fail test: numerical test results are not provided. It is generally not practical to construct a building solely from noncombustible materials. Consequently, numerous combustible materials are permitted in noncombustible construction.

For more than a decade now, code writers have wanted to be able to distinguish between various levels or degrees of combustibility: from noncombustible to highly combustible. Specifying the use of noncombustible materials was a convenient but conservative measure. A more practical solution would be to allow some degree of combustibility, within safe limits. Although Code committees have wanted to move in this direction, the lack of a suitable test has prevented them from doing so. Attempts to modify CAN4-S114 to serve this function have not met with success. The apparatus can determine readily if a material is combustible or not; it cannot easily be used to assess the degree of combustibility of combustible materials.

A New Noncombustibility Test

Efforts are under way to develop a test method to determine the degree of noncombustibility of materials. It is intended that the test method be modelled after an existing American test developed for a different purpose.[11]

The test specimen will be put into a small ventilated chamber and subjected to two different levels of radiant thermal exposure. Piloted ignition will be attempted with a small flame. The critical measurement will be the heat release rate of the material for two exposures.

Using these data it will be possible to set up categories of combustible materials. These categories, which would reflect the contribution of a material to fire development and severity, could be referenced in the NBC.

Equivalencies and Design Considerations

Fire protection requirements in the NBC are intended to ensure a minimum level of life safety in buildings. It is argued that these requirements provide, for the most part, adequate time for occupants to reach an area of safety within or outside the building.

From time to time, in considering the design of some buildings it is found that these requirements are inconsistent with the spirit of the design. In these cases the requirements are generally felt to be too 'restrictive'. This may occur in the design of a new building or in a major renovation of an existing building.

It is not possible to foresee all design considerations in developing the NBC. To encourage the use of new technologies or design options which are not expressly covered in the NBC, Subsection 2.5 permits the use of solutions which can be demonstrated to yield levels of safety equivalent to those provided by the NBC requirements. Most provincial building codes adopt a similar policy in some form. It is generally necessary to provide documentation supporting the claim that the design meets the intent of the NBC requirements.

One of the purposes of this seminar is to demonstrate, using examples, how equivalent solutions can be developed. These examples have been chosen strictly to demonstrate the processes and logic involved. There may well be design scenarios in which these examples would yield solutions which are not up to the mark.

Take for example the case of a large lumber company that wishes to build a new corporate head office. The company insists that the building be of combustible construction, as it is to be a show-piece of wood-frame construction with several larger rooms lined with the finest in wood panelling.

An architect, well versed in wood-frame construction, has been selected to design the building. In his first meeting with the company he learns that the building is to be 3 storeys in height and each storey is to be 5,500 m^2 in area. He immediately points out that according to Article 3.2.2.30 in the NBC, the building must be of noncombustible construction. The largest storey area permitted in a three storey office building of combustible construction is 4,800 m^2, provided the building is sprinklered and faces three streets.

As the company insists that the building be of wood-frame construction, the architect must develop an equivalent solution. This may entail exceeding building code requirements for buildings of this size in order to provide sufficient time for occupants to escape. The architect may propose any combination of the following actions:

- exceed the required number of exits and provide for shorter travel distances to exits than required;
- exceed the number of required fire detectors and alarms;
- employ fast-response sprinklers in place of ordinary sprinklers;
- build in improved compartmentation within the building;
- provide for an in-house fire brigade.

To ensure that neighbouring buildings are not likely to become involved in a fire should this building burn, the minimum required limiting distances to lot lines should be exceeded.

As the proposed storey area of 5,500 m^2 exceeds the permitted value of 4,800 m^2 by a small amount, it is possible that by exceeding the minimum requirements in the NBC, the architect may persuade the authorities having jurisdiction to permit the building to be of wood-frame construction. The architect should be prepared to demonstrate that the equivalent solution provides a level of safety equal to or better than that provided by NBC requirements. Fire experience, testing and computer models (presented in the following paper) may provide the information needed to demonstrate the equivalency.

Summary

Restricting the combustibility of building materials plays an obvious role in the provision of fire safety. Yet specifying the use of noncombustible materials is not always a practical solution, In this lecture, a review of test procedures aimed at segregating materials into combustible and noncombustible categories was presented, as well as an explanation of the intent of requirements for noncombustible construction contained in the NBC. The need for development of more useful test methods for evaluating the degree of combustibility of building materials was also discussed. Finally it has been shown that designs which can be demonstrated to yield equivalent levels of safety to NBC requirements, can often find acceptance by authorities having jurisdiction.

References

1. National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23174. 454 p.

2. Fire Losses in Canada, Annual Report 1984. Office of the Fire Commissioner of Canada, Ottawa, Ontario, 1986. 23 p.

3. Phillips, D., and Kasem, M.A., 1985, "Upholstered Furniture Fires in Canada", Consumer and Corporate Affairs Canada, L10127-F32 84/85, 29 p.

4. National Fire Code of Canada 1985, National Research Council of Canada, Associate Committee on the National Fire Code, NRCC 23175. 168 p.

5. Method of Test for Combustion Resistance of Mattresses - Cigarette Test, 1977. CAN2-4.2-M77, Method 27.7, Canadian Government Specifications Board, Ottawa, 6 p.

6. Standard Test Method for Flammability of Clothing Textiles, 1980. ASTM D1230-61, Annual Book of ASTM Standards, Part 18, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 5 p.

7. Method of Test for Flammability - Methenamine Tablet Test for Textile Floor Coverings, 1977 .CAN2-4.2-M77, Method 27.6, Canadian Government Specifications Board, Ottawa, 2 p.

8. Standard Method of Test for Determination of Non-Combustibility in Building Materials, 1980. CAN4-S114-M80, Underwriters' Laboratories of Canada, Scarborough, Ontario, 15 p.

9. "Metals" Section 5/Chapter 10 in Fire Protection Handbook,1986. 16th Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA

10. Supplement to the National Building Code of Canada 1985, Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23178, 278 p.

11. Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products, 1986. ASTM E906, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.07, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 915-936.

Flammability of Building Materials and Fire Growth

J.R. Mehaffey, Ph.D.

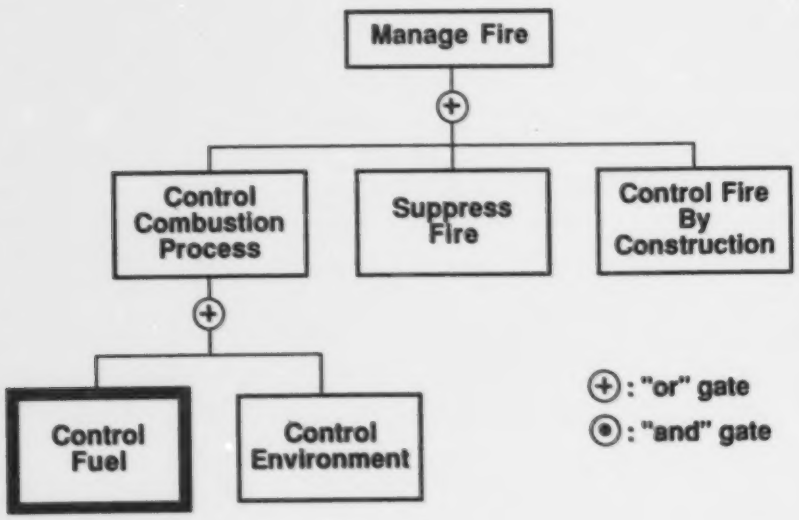
Introduction

Despite efforts to restrict the use of combustible material in buildings and to prevent ignition, fires will continue to start. Whether these fires grow and how quickly, depends to a large extent on the basic flammability of building materials and contents, as well as on the building design. The more quickly a fire develops, the less time occupants of the building have to escape.

To provide building occupants with sufficient time to escape, building codes and other regulations restrict the flammability of building materials and contents. Controlling the fuel in this manner may impede the rate of fire growth significantly. Generally, the extent to which flammability is restricted by the codes depends on the building size, the hazards it contains, the mobility and level of awareness of its occupants, and whether it is sprinklered. The control of fuel, as it relates to the objectives in the Fire Safety Concepts Tree, is shown in Figure 1.

In this paper the relationship between product flammability and fire growth is explored. The nature and status of regulations based on existing test methods are outlined. The potential impact of computer models for fire growth on material selection and building design are discussed.

Figure 1 Control of Fuel, in the Manage Fire sub-branch of fire safety tree



Room-Fire Growth

When an object in a room starts to burn (such as the armchair in Figure 2), for some time after ignition, it burns in much the same way as it would in the open. After a short period of time, however, confinement begins to influence fire development. The smoke produced by the burning object rises to form a hot gas layer below the ceiling; this layer heats the ceiling and upper walls of the room. Thermal radiation from the hot layer, ceiling, and upper walls begins to heat all objects in the lower part of the room and may augment both the rate of burning of the original object and the rate of flame spread over its surface.

At this point, the fire may go out if, for example, the first object burns completely before others start, or if sufficient oxygen cannot get into the room to keep the object burning. Sometimes, however, the heating of the other combustibles in the room continues to the point where they reach their ignition temperatures more or less simultaneously. If this occurs, flames suddenly sweep across the room, involving most combustibles in the fire. This transition from the burning of one or two objects to full room involvement is referred to as 'flashover'.

Usually at the time of flashover, windows in the room will break, allowing for the entry of fresh air. The fire burns vigorously for some time until the combustibles are mostly consumed. Flaming eventually ceases, leaving a mass of glowing embers.

The course of a compartment fire can be expressed in terms of the average gas temperature in the room. Figure 3 illustrates three stages of such a fire:

1) the growth or preflashover stage, in which the average temperature is low and the fire is localized in the vicinity of its origin;
2) the fully developed or post-flashover fire, during which all combustible items in the compartment are involved and flames appear to fill the entire volume; and
3) the decay or cooling period.

The dashed line represents the scenario in which the first item burns completely before flashover. In one- and two-storey apartment buildings, only 22% of fires proceed to flashover (from an analysis of U.S. data obtained from the National

Figure 3 Upper layer temperature during a room fire

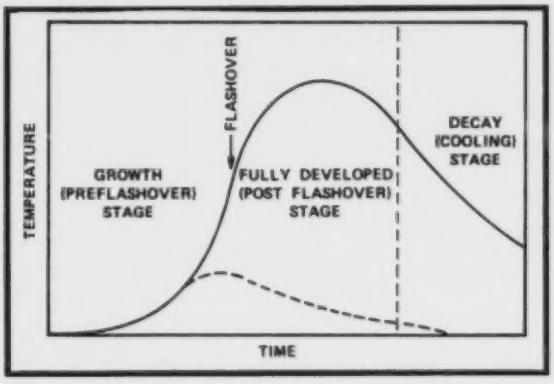
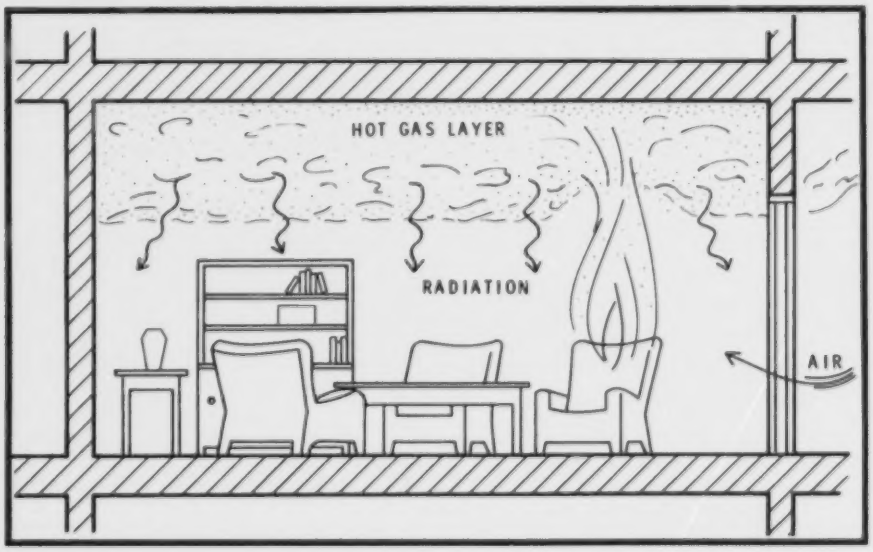


Figure 2 Fire growth in a confined space



Fire Incident Reporting System). The preflashover period lasts from 5 to 20 minutes, the fully-developed fire period lasts 20 to 40 minutes, and the decay period, more than an hour.

The description of preflashover fire growth outlined above would apply even where the walls or ceiling were noncombustible. In a different scenario, the final major item ignited is a wall or perhaps a ceiling. Suppose, for example, a fire starts in a wastepaper basket situated in a corner of a room lined with a combustible wall covering. If the wall is sufficiently flammable, it will catch fire and, depending on its flame-spreading propensity, flames will begin to grow vertically along the corner. If flames reach the ceiling and spread along the upper wall, flashover is likely to occur. What is important in determining the contribution of a wall to fire growth is its flame-spread propensity.

Whether the initial item ignited is a piece of furniture or a wall, flashover is imminent should the temperature of the hot upper layer in the room reach 500 to 600°C.[1] Clearly, under such conditions, occupants of the room will have perished if they have not escaped.

Historical Background

Historical fire incidents reveal that both furniture and combustible wall linings can contribute significantly to the growth of fires. Until recently, means to regulate furniture materials were not in place. However, some time ago, code-writing bodies (which can regulate only materials used in building construction) saw the opportunity to use such regulations to increase control over fire losses (including deaths).

During the 1940's several fire disasters in the United States highlighted the need to regulate interior finishes in buildings.[2,3] In the Cocoanut Grove Night Club fire in 1942, 492 people were killed when flames moved quickly across a cotton cloth which covered the ceiling of the lounge. Other significant fires of the time include the Winecoff Hotel, LaSalle Hotel, and Canfield Hotel fires in 1946, and the St. Anthony Hospital fire in 1949. The magnitude of loss in all these fires was directly related to the rapidity of flame spread on the interior finish. The extensive loss of lives was attributed to asphyxiation as well. It became clear that it was necessary to test and classify materials with regard to three essential properties: flame spread, fuel contributed and smoke developed. In this paper it is the flame spread which is of immediate interest.

The Tunnel Test

In response to these needs, the tunnel test was developed by A. Steiner at Underwriters Laboratories Inc. in the United States.[3] This test has been employed in Canada since 1960 to test materials for compliance with requirements in the National Building Code.[4]

The test equipment consists of a horizontal tunnel 7.6 m long, 450 mm wide, and 300 mm deep (Figure 4). The roof is removable and lined with a low density material of mineral composition. The walls and floor are constructed of refractory fire brick. One wall has observation windows along its length.

Figure 4 The tunnel test apparatus

Flames from two burners at one end are forced down the tunnel by a steady draught of air at 1.2 m/s. These burner flames are about 1.37 m long, release heat at a steady rate of about 90 kW, and impinge directly on the test specimen, which is mounted either on the floor or on the ceiling of the tunnel. This exposure is similar in intensity to what occurs when a small piece of furniture leaning against a wall is set on fire. The tunnel is calibrated by adjusting the rate of heat release of the burners so that it takes about five and a half minutes for flames to reach the exhaust end of the tunnel when the specimen is 18 mm select-grade red oak. In the exhaust duct at the end of the tunnel are a light source and detector for measuring smoke and a thermocouple for determining heat released.

Before testing, specimens are conditioned at a temperature of 23 ± 3°C and at a relative humidity of 50 ± 5% until their mass reaches a stable value. This may take a few days to several weeks, depending on the type of product and its initial moisture content.

In Canada, building materials to be tested are mounted on and form either the ceiling or the floor of the tunnel. If the material can support itself in position, or can be supported, it is mounted on the ceiling and tested in accordance with the National Standard of Canada CAN4-S102-M83, Standard Method of Test for Surface-Burning Characteristics of Building Materials and Assemblies.[5] If, however, the material is to be the finished surface or covering of a floor, or cannot be tested when mounted on the ceiling because it melts and drips or otherwise cannot support its own weight, it is tested on the floor in accordance with CAN4-S102.2-M83, Standard Method of Test for Surface-Burning Characteristics of Flooring, Floor Covering, and Miscellaneous Materials and Assemblies.[6] American versions of the tunnel test do not allow for the testing of floor-mounted samples. (There are a few other minor operational differences between the Canadian and American tests).

Flame Spread Classifications of Building Products

To determine the Flame Spread Classification (FSC) of a material, the burners are ignited and the advance of the flame front along the test specimen is recorded for ten minutes. The detailed methods for computing the FSC are included as an Appendix. The calculation methods are designed so that the FSC of a noncombustible inorganic board is zero, and that of red oak is 100. The values for all other products are determined in comparison with these materials.

The flame front position–versus–time curves for red oak and 6 mm Douglas fir plywood are shown in Figure 5, the curve for 12.7 mm gypsum wallboard in Figure 6, for a loose-fill cellulose insulation in Figure 7, and for a polyurethane foam insulation in Figure 8. There are clearly significant differences in the performance of these materials during the test. The methods for determining FSC have been carefully designed to account for these differences. Using

Figure 5 Time – distance curves for red oak and 6 mm Douglas fir plywood. Distance is measured from the burners. The area under A_1 = 43.0 m•min for red oak and 47.2 m•min for plywood.

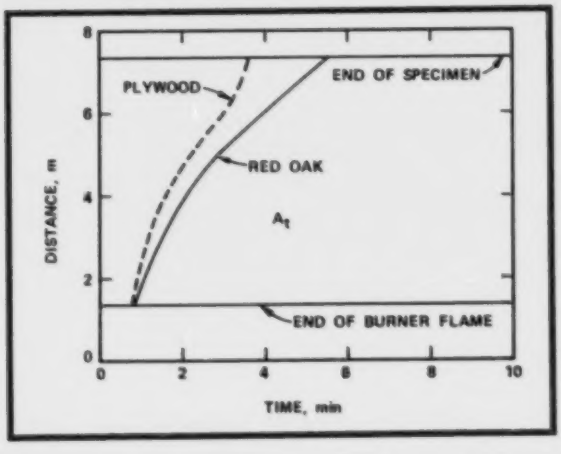
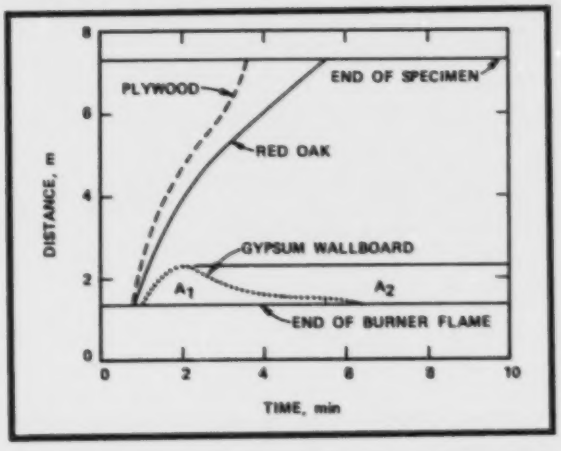


Figure 6 Time – distance curves for 6 mm Douglas fir plywood, 18 mm red oak, and 12.7 mm gypsum wallboard. Note that in the testing of gypsum wallboard, the flame front advances until the two-minute mark and then recedes. The area under the curve is given as $A_t = A_1 + A_2 + 8.0$ m•min.



the data presented in Figs. 5 to 8, the FSC of red oak is found to be 100, that of 6 mm Douglas fir plywood is 135; the 12.7 mm gypsum wallboard has a rating of 15, the loose-fill cellulose insulation of 55, and the foam insulation, 427.

Years of testing experience have shown that results can vary from test to test for the same material. For this reason, it is common to conduct three tests on specimens of a product and to quote its FSC as the average of the three tests. Nonetheless, FSC's do provide a ranking of lining materials which reflects their performance in a real fire. In general, the larger the FSC, the faster the fire grows.

Shortcomings of the Tunnel Test

Although the tunnel is useful in selecting fire-safe materials, it has shortcomings. Field conditions differ from those of the test; it is not always clear when the relative performance of materials in the field can be determined on the basis of their performance in the tunnel. For example, tunnel test performance bears little relation to how thermal insulation in a cavity wall behaves in the event of fire in the cavity.[7] Even for lining materials, it is sometimes difficult to interpret the tunnel test results; in such cases a second test is used, the Underwriters' Laboratories of Canada test ULC-S127-M82, Standard Corner Wall Method of Test for Flammability Characteristics of Non-Melting Building Materials.[8] Fundamental research into fire growth has shown that more detailed information than that provided by the tunnel is necessary before accurate predictions of flame spread can be made.

Product Testing and Test Results

Four Canadian Laboratories are equipped to perform tunnel tests:

- National Research Council of Canada (NRCC), Ottawa, Ontario (generally, NRCC does not engage in commercial tunnel testing),
- Ontario Research Foundation (ORF), Mississauga, Ontario,
- Underwriters' Laboratories of Canada (ULC), Scarborough, Ontario (2 tunnels),
- Warnock Hersey Professional Services (WHPS), Coquitlam, B.C.

ULC and WHPS also offer certification programs. They test products for manufacturers and list the results in publications released regularly. These publications may be purchased by the general public.[9,10]

After many years of testing, much has been learned about the test performance of interior finish materials. Some of that information is summarized in Table 1, which is a simplification of Table 3.1.A. in the Supplement to the National Building Code of Canada 1985.[11] These ratings apply only to generic materials that conform to standards referenced in the Supplement. The FSC's of materials that are similar to those listed in the table, but actually vary from the specifications of the standards, may differ significantly from the values shown in the table.

Figure 7 Example of time – distance curve with flame front recession and a subsequent advance

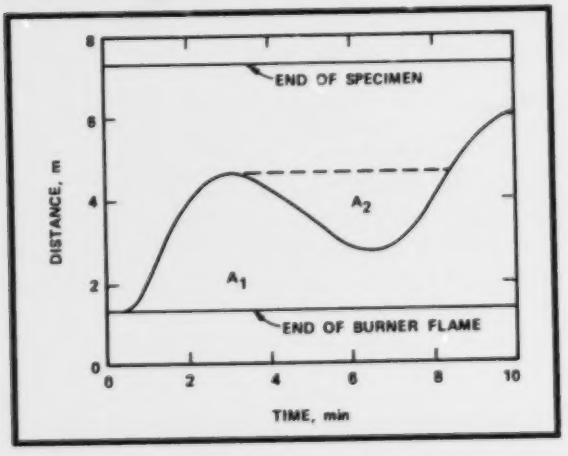


Figure 8 Time – distance curve for a polyurethane foam. The flame advances early in the test. Distance d is 3.7 m and time t, 0.8 min.

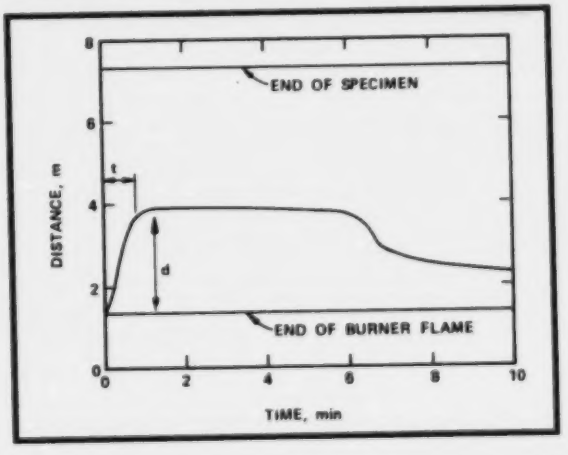


Table 1 Assigned flame spread classifications for combinations of wall and ceiling finish materials and surface coatings

Materials	Minimum thickness, mm	Unfinished	Paint or varnish ≤ 1.3 mm thick Cellulosic wallpaper ≤ 1 layer
Asbestos cement board	None	0	25
Brick, concrete tile	None	0	25
Steel, copper, aluminium	0.33	0	25
Gypsum plaster	None	0	25
Gypsum wallboard	9.5	25	25
Lumber	16	150	150
Douglas Fir plywood	11	150	150
Poplar plywood	11	150	150
Plywood with Spruce face veneer	11	150	150
Douglas Fir plywood	6	150	150
Fiberboard low density	11	>150	150
Hardboard Type 1	9	150	*
Standard	6	150	150
Particleboard	12.7	150	*

* Insufficient test information available

Building Code Requirements

Requirements for the Flame Spread Ratings of interior finish materials are contained within the National Building Code of Canada 1985.[12] For buildings which must conform to Part 3, the requirements are contained in Subsection 3.1.11; for those which must conform to Part 9, Subsection 9.10.16 is relevant.

The purpose of these building code requirements is to ensure that, should walls and ceilings become involved in a fire in its early stages, they will not spread flames so quickly that occupants cannot escape. Generally, the lower the flame spread rating of a wall or ceiling, the more time is available to escape. The time required to escape may depend upon the building size, location of the fire within a building, the mobility and level of awareness of occupants, and whether or not sprinklers are present.

In many areas of high risk to occupants, such as exits, flame spread ratings of walls and ceilings are required to be no more than 25. This value was selected as it is close to the value for gypsum wallboard, a material assumed to be safe for the purpose. In practice, any lining material which performs as well as or better than gypsum wallboard is permitted.

In hospitals or prisons, where occupants may have limited mobility or awareness, and in cinemas, where evacuation may be slow due to

lack of direction, if there are no sprinklers, walls and ceilings must have a flame spread rating of not more than 75 to ensure sufficient time to escape. If sprinklers are present, the requirements are relaxed to 150, as sprinklers retard fire growth and provide more time for escape.

As another example, interior finish materials used on walls of residential rooms are required to have a flame spread rating not exceeding 150. This value was selected as it is close to the value for 6 mm Douglas fir plywood, a material which has been found to be acceptable on the basis of actual fire experience. In practice, any lining material which performs as well as or better than 6 mm Douglas fir plywood is permitted.

Another way to look at the building code requirements is in terms of options available for escape. Generally, walls in rooms are permitted to have an FSC of 150, walls in corridors leading to exits to have an FSC of 75, and walls in exits to have an FSC of only 25. The least stringent requirements appear in the room, as an occupant can flee from a room fire either to find refuge elsewhere in the building or to escape from the building. More stringent requirements appear in a corridor, as a serious fire there could prevent all occupants of a storey from escaping. The most stringent requirements appear in exits, since a serious fire in the exit could prevent all occupants of the building from escaping.

Combustible Furniture and Furnishings

Early fire growth in a room is not always attributable to flame spread along walls or ceilings. Furniture or other furnishings are more commonly the principal contributors to early fire growth.[13] As mentioned earlier, if a piece of furniture or a wall burns quickly enough to cause the temperature in the upper part of the room to reach 500 to 600°C, then flashover will occur in the room.

A critical rate of heat release (or a critical burning rate) must be exceeded (and presumably maintained for some period of time) before flashover can occur in a room.[14] The temperature in the room can continue to increase only if the rate of heat production (release) in the room is greater than the sum of the rates of heat loss from the room. The equation can be written:

Temperature increase if:

Rate of heat release	>	Rate of heat loss to boundaries	+	Rate of heat loss through openings

A simple model indicates that for a given room the critical rate of heat release required to cause flashover depends principally upon:

- the area of the room boundaries,
- thermal properties of the room boundaries,
- the size and shape of all openings, and
- the duration of burning of the item first ignited.[14]

For typical rooms found in dwellings, the critical rate of heat release is usually about 1 MW.

Upholstered chairs release heat at rates from 0.4 MW up to 2.5 MW when they burn,[15] so some upholstered chairs will cause a flashover on their own and some will not. This allows for the possibility of selecting 'safe' furnishings in the future. However, the theory still needs some work and it is not yet certain whether society or the marketplace would accept such limits. Clearly, there is a need to develop a means of determining the rate of heat release from burning items of furniture.

Room-Fire Test

To improve the understanding of preflashover fire growth, both ASTM[16] and ISO[17] are developing standard room-fire tests. These tests are intended to evaluate first the contribution of combustible walls or ceilings to room-fire growth.

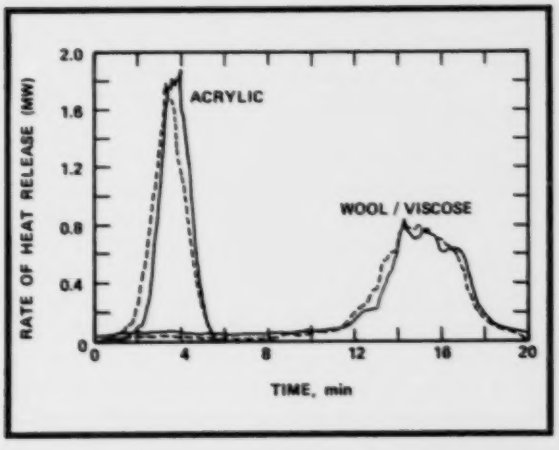
The tests are conducted in a room with floor dimensions of 2.4 x 3.6 m, and a height of 2.4 m. The walls or ceiling or both are lined with the interior finish to be tested. The experiment is started with a small fire source in the corner of the otherwise empty room. In this early phase, the fire is not intense enough to cause the room to reach flashover; flashover can occur only after the walls or ceiling catch fire. During the experiment, the maximum extent of fire growth along the combustible walls or ceiling, the rates of generation of smoke and toxic gases, and the time to flashover (should it occur) are recorded. Most important, the rate of heat release of the burning material is determined.

The fire performance of products in these full-scale experiments is to be compared with their performance in small-scale flammability tests. The comparison may aid in the development or modification of the small-scale tests. The test results may also prove useful in the development of mathematical models to predict the course of room fires (more about this later).

Room-fire testing has shed light on the utility of the flame spread classification of materials as determined using the tunnel test. When a room is lined with gypsum wallboard (FSC = 15) and a small ignition source (~ 100 kW – equivalent in intensity to a severe waste paper basket fire) is placed in a corner of the room, flashover does not occur.[3] Occupants have a great deal of time to escape. On the other hand, in a room with 6 mm Douglas fir plywood walls and ceiling (FSC ~ 135), the time to flashover is only about three minutes or less, given the same ignition source.[18] The time available to escape has been greatly reduced. In a room lined with a polyurethane foam (FSC ~ 500), the time to flashover can be as low as 13 seconds.[3] There is almost no time for escape. This is the reason that the building code requires a protective barrier to cover such insulation.

Efforts are already under way to broaden the scope of the test method to include the evaluation of the contribution of room furnishings to fire growth. In Sweden, room burn experiments conducted on two sofas ignited by small 40 g wooden cribs, showed interesting results.[17] Figure 9 shows the heat release rates of two sofas with the same untreated polyurethane padding, and upholstery fabrics of acrylic and wool/viscose. There is a substantial difference in their burning behavior. The fire spreads very quickly on the sofa covered with an acrylic fabric and the peak burning rate is reached within four minutes. The wool/viscose fabric, on the other hand, protects the padding and the fire develops very slowly, reaching a peak intensity of half the magnitude of the acrylic after fourteen minutes. The two sofas were both completely consumed by fire, and both caused flashover conditions to be reached in the room, although at very different times. Clearly the time available to escape was substantially different as well.

Figure 9 Rate of heat release versus time for two sofas tested in a standard room. The dashed and solid lines reflect results of two separate methods for determining rates of heat release (drawing after Wickström et al, Ref. 17).



Room-fire testing is a promising method for analyzing product performance in a realistic scenario. It provides a very clear indication of the available safe egress time. Unfortunately, room-fire tests are expensive to run and only one scenario can be modeled at a time.

Computer Modelling

In recent years, a great deal of effort has been expended in developing mathematical models to predict various aspects of fire behaviour in buildings. One area of significant activity is the development of models for predicting the rates of fire growth, and production and movement of smoke in fires. These models can be used to predict the time available to escape before a room or building becomes untenable. The models offer a cost–effective method for analyzing the impact of material selection or building design on fire safety.

There are two basic approaches to mathematical modelling of fires – probabilistic modelling and deterministic modelling. Probabilistic models describe fire development as a sequence of events (ignition, flame spread, flashover, etc.) and predict the transition from one event to another by probabilities.[19] Such models are based on years of fire experience but do not rely much on the fundamental chemistry and physics involved in room fires. On the other hand, in deterministic models, the problem and the configuration are prescribed, and the laws of physics and chemistry dictate the evolution of the fire. Both probabilistic and deterministic models consist of a set of mathematical equations that must be solved simultaneously. This is often practical only by using a computer.

Deterministic models can be further subdivided into field models and zone models. In field modelling, the conditions at every point of space, at any moment, are given by the solutions of a complex set of partial differential equations. Generally, field models put large demands on computer power. In zone models, the fire compartment is divided into a group of zones and interactions (mass and heat transfer) between the zones are modelled. Although zone models are still evolving, several are already in use for solving fire safety problems.

In a zone model for a single room fire, the relevant zones might be the burning object, the flame, the heat layer, the cold layer, the vents (openings), target objects (not yet ignited), and the room boundaries. The various important physical interactions between the zones are depicted in Figure 10. For example, heat is transferred to the burning object from the flame, from the upper layer, and from the room boundaries. This heat causes the object to undergo pyrolysis and volatiles (mass) are transferred to the flame. Relationships of this sort must be developed for each zone. The zone model comprises a set of equations describing the interactions between the zones.

Depending on the scenario being simulated, several zone models are available. Some are designed to consider single room fires only,[20,21] others treat the movement of smoke and fire through an entire building.[22] Some address only the time available to escape a fire,[23] others deal with fire behaviour from ignition to extinguishment. Any model should be used only for the purpose for which it was designed, and only after it has been validated. One of the most frustrating experiences incurred in using models is finding the necessary input data.

The Harvard Mark 5

Developed at Harvard University by H. Emmons and H. Mitler, the Harvard Mark 5 is one of the best known models.[20] It is a deterministic, zone model and one of the most comprehensive developed to date for the prediction of room fire dynamics. In its present form, it does not directly address the safety of occupants in the immediate area.

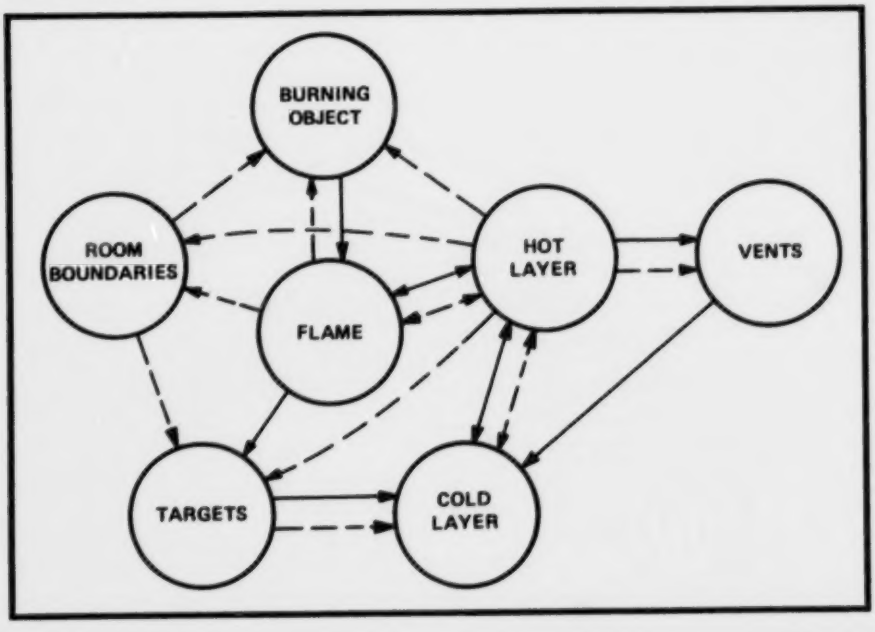
The situation modeled includes a single room of any size, with one to five vents in its walls, and containing up to five objects. One of the objects (for example a mattress) begins to burn and the subsequent fire behavior in the room is predicted. The model uses the thermophysical properties of materials as input for the calculations. The model has been found to predict with some success the outcome of a series of bedroom fires conducted at Factory Mutual Research Corporation.[20]

Recent improvements in the model make provisions for the burning of walls and ceilings, the possibility of forced-air ventilation, and multi-room fires. In its various levels of development, the model has been used several times for forensic analysis of specific fires, such as the MGM Grand fire and the Beverley Hills Supper Club fire.

ASET (Available Safe Egress Time)

Developed at the National Bureau of Standards (USA) by L.Y. Cooper, ASET[22] is a deterministic zone model which predicts the time available for

Figure 10 Interactions of the components of a room fire model; --- heat transfer, — mass transfer



occupants to safely evacuate a compartment in the event of a fire. The time that occupants have for escape is the time between the detection of the fire and the onset of hazardous conditions. This is referred to as the available safe egress time. Within the model, the fire growth process is treated less vigorously than in the Mark 5 model. Unlike Mark 5, however, ASET is written in such a manner that the time of fire detection and the time of onset of conditions hazardous to occupants are predicted.

Equivalencies and Design Considerations

Code requirements are intended to provide a minimum acceptable level of safety. Other solutions providing the same or a better level of safety are permitted according to Subsection 2.5 in the NBCC.

It is clear that the flame spread requirements within the code are intended to delay fire growth, providing occupants in the immediate area with sufficient time to escape and fire fighters more time to respond. However, the exact time provided by a building code requirement is not usually known. That is, the level of safety required is not quantified.

The following hypothetical examples show how equivalency may be demonstrated.

Example 1

A company designing a highrise office building wishes to line a small meeting room with a new product advertised as having an FSC of 160. According to the NBC, only products with an FSC of 150 or less are permitted. The company is willing to pay for additional fire protection hardware in order to develop a design which provides protection equivalent to the NBC requirement.

Several possibilities exist. One solution might be to equip the room with sprinklers in order to suppress a fire quickly and allow for safe egress. However, it is probably not economical to install them in one room in a building which might otherwise be unsprinklered. In addition, there are some concerns about smoke movement in the presence of sprinkler spray.

Another approach might be to install smoke alarms within the room to ensure that egress begins more quickly than would otherwise be anticipated without automatic detection in the room. To prevent fire and smoke from spreading beyond the room, self-closing doors with a higher degree of fire resistance than required by the code might also be installed.

Mathematical models can also make a significant contribution in the assessment of the above equivalencies. Models can be used to establish the egress time available as well as the time at which fire is expected to spread outside the meeting room. If the proposed solution provides the same or more time for these two events than does the building code solution, it can be reasonably concluded that equivalent safety exists.

Example 2

Prison authorities have learned that a cheaper line of prison furniture has been released. They would like to replace their existing furniture with the cheaper line but are concerned that the new furniture may not provide sufficient fire protection. Unfortunately, the NBC provides no guidance for the selection of furniture.

Prison authorities feel that the existing furniture provides a tolerable level of safety. Several fires involving the existing furniture have occurred but none have resulted in serious loss of life or property.

As materials permitted in a prison cell are restricted and the layout of the furniture can be controlled, it is possible to design room fire tests which can assess the relative performance of the existing and the new furniture within the prison. By selecting a likely ignition source, the resistance to ignition of the two furniture lines can be compared. In addition, the time for the development of hazardous conditions within a cell and within a ward can be determined. If the new line of furniture performs as well or better than the existing line, it is clearly wise to make the change. On the other hand, if the new line performs much worse than the existing line, very serious fires could result.

Summary

The relationship between flammability testing on building materials and contents and the requirements of the National Building Code have been explored. It has been argued that the practice of basing fire safety requirements for interior finish materials on their performance in the tunnel test, as has been done in Canada since 1960, is a sound one. On the other hand, recent developments in fire research, particularly in room-fire testing and computer modelling, will probably foster the development of more exact flammability performance requirements for building materials and contents, and provide a framework for improved fire safety design of buildings.

References

1. Peacock, R.D., and J.N. Breese, 1982. *Computer fire modeling for the prediction of flashover*, NBSIR 82-2516, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD.

2. Moulton, R.S., 1961. *Interior finish for life safety from fire*, NFPA Quarterly, Vol. 55, No.1, pp. 43-50.

3. Abrams, M.S., M.V. D'Souza, P. Higginson, W.S. Metes, J.G. Quintiere, W.J. Parker, R.F. Robins, and J.A. White, Jr., 1985. *Review of ASTM test for surface burning characteristics of building material (E84)* (An ASTM White Paper), Journal of Testing and Evaluation, Vol. 13, No. 2, pp. 89-114.

4. National Building Code of Canada 1960. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 5800.

5. Standard Method of Test for Surface-Burning Characteristics of Building Materials and Assemblies, 1983. Underwriters' Laboratories of Canada, ULC Standard CAN4-S102-M83, Scarborough, Ontario, 30p.

6. Standard Method of Test for Surface-Burning Characteristics of Flooring, Floor Covering, and Miscellaneous Materials and Assemblies, 1983. Underwriters' Laboratories of Canada, ULC Standard CAN4-S102.2-M83, Scarborough, Ontario, 25p.

7. Mehaffey, J.R., 1986. *Fire performance of combustible insulation in buildings, in* Proceedings of the 30th Annual Technical/ Marketing Conference – Polyurethanes, Exploring New Horizons, co-sponsored by the SPI Polyurethane Division of SPI Canada Rigid Foam Division, Toronto, 7p.

8. Standard Corner Wall Method of Test for Flammability Characteristics of Non-Melting Building Materials, 1982. Underwriters' Laboratories of Canada, ULCS127-M82, Scarborough, Ontario, 9p.

9. List of Equipment and Materials, 1986. Volume II Building Construction, Underwriters' Laboratories of Canada, Scarborough, Ontario, 709p.

10. Fire Laboratories Listings, 1986. Warnock Hersey Professional Services Ltd., Mississauga, Ontario

11. Supplement to the National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23178, 278p.

12. National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23174, 454p.

13. Phillips, D., and M.A. Kasem, 1985. Upholstered Furniture Fires in Canada, Consumer and Corporate Affairs Canada, L10127-F32 84/85, Ottawa, 29p.

14. McCaffrey, B.J., J.G. Quintiere, and M.F. Harkleroad, 1981. *Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations*, Fire Technology, Vol.17, pp. 98-119.

15. Babrauskas, V., 1983. *Upholstered furniture. Heat release rates: measurements and estimation*, Journal of Fire Sciences, Vol. 1, pp. 9-32.

16. Proposed Method for Room Fire Test of Wall and Ceiling Materials and Assemblies, 1982. Annual Book of ASTM Standards, Part 18, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 1618-38.

17. Wickström, U., B. Sundström, and G. Holmstedt, 1983. *The development of a full-scale room fire test*, Fire Safety Journal, Vol. 5, pp. 191-7.

18. Fisher, F.L., and R.B. Williamson, 1983. Intralaboratory Evaluation of a Room Fire Test Method, NBS-GCR-83-421, National Bureau of Standards (USA), Gaithersburg, MD, 110p.

19. Fahy, R.F., 1985. *Building fire simulation model. An overview*, Fire Safety Journal, Vol. 9, pp. 189-203.

20. Mitler, H.E., 1985. *The Harvard fire model*, Fire Safety Journal Vol. 9, pp. 7-16.

21. Smith, E.E., 1985. *Computer based hazard assessment using release rate test data*, Fire Safety Journal, Vol. 9, pp. 47-54.

22. Jones, W.W., *A multicomponent model for the spread of fire, smoke and toxic gases*, Fire Safety Journal, Vol. 9, pp. 55-80.

23. Cooper, L.Y., and D.W. Stroup, 1985. *ASET – A computer program for calculating available safe egress time*, Fire Safety Journal, Vol. 9, pp. 29-46.

Appendix A

Determination of Flame Spread Classification

To determine the Flame Spread Classification (FSC) of a material, the burners are ignited and the advance of the flame front along the test specimen is recorded for ten minutes. The flame front position is plotted as a function of time. The curves for red oak and for 6 mm Douglas fir plywood are shown in Figure 5. The area under the flame front position–versus–time curve (A_t) is calculated.

The FSC_1 (note the subscript 1) is defined in terms of the area A_t as follows:

$$FSC_1 = 1.85\,A_t \quad \text{for } A_t \leq 29.7 \text{ m•min}$$

$$FSC_1 = \frac{1640}{59.4 - A_t} \quad \text{for } A_t > 29.7 \text{ m•min}$$

The FSC_1 of noncombustible materials is zero, and that of red oak is 100. The values for all other products are determined in comparison with these materials. Using the test results shown in Figure 5 for 6 mm Douglas fir plywood, its FSC_1 is 135. (FSC_1 is not a direct measure of the rate of flame spread. However, the faster the flame gets to the end of the tunnel, the larger is A_t and hence FSC_1).

For some products, the flame front may advance for a while and then recede. For example, the flame front–versus–time curve for 12.7 mm gypsum wallboard is shown in Figure 6. After two minutes of testing, the flame had advanced to 2.3 m, and it then receded. The area under the flame front–versus–time curve is calculated as if the regression had not occurred, and thus A_t is the sum of A_1 and A_2. Using the test results shown in Figure 6 for the wallboard, its FSC_1 is 15.

Occasionally the flame front may recede for a while and then advance again, for example, when testing loose-fill cellulose insulation. In the test shown in Figure 7, the flame spread 4.7 m in three minutes, then receded and subsequently advanced again. The area is calculated as if the flame had spread to 4.7 m in three minutes and then remained at 4.7 m until the flame front again passed 4.7 m (dashed line). The area (A_t) used for calculating the Flame Spread Classification (FSC_1) is the sum of areas A_1 and A_2 in Figure 7.

The FSC_1 calculated from the tunnel test gives a ranking of materials which was assumed to reflect their performance in a real fire. For wood-based products this assumption appears to hold up. However, it became evident in the early 1970's that many foamed-plastic insulations with low FSC_1's, if left exposed as a wall or ceiling lining in a room, could spread flames quickly once ignited.[A1]

In Canada, the tunnel standards were amended in 1978 to take account of the unusual behavior of foamed plastics under the test conditions.[A2, A3] Close observation at NRC revealed that the flame front advances rapidly during the early part of the test, but then slows down and in some cases fails to advance further or actually recedes during the remainder of the test period. As the initial rapid flame spread was considered to be of prime importance in the development of a real fire, the use of an equation which gives emphasis to this early spread was introduced.

A second FSC, for foamed plastics (FSC_2), is calculated as

$$FSC_2 = 92.3\, d/t$$

where t is the time in minutes for the flame front to propagate a distance d metres, where there is a marked reduction in the advance of the flame front. Although the application of the concept is not without problems, the new calculation gives a classification for foamed plastics that is closer to its performance in real-world fires.

In Figure 8, the flame front–versus–time curve for a polyurethane foam is presented. Compared to the data for conventional materials presented in Figures 6 and 7, the flame advance along the foam commenced much sooner. For this foam, $FSC_1 = 74$ and $FSC_2 = 427$.

In those cases where the flame spread quickly in the early part of the test but it was difficult to establish the point at which the flame front declined, then the FSC_3 is determined by the results from a test conducted in accordance with ULC-S127-M82, Standard Corner Wall Method of Test for Flammability Characteristics of Non-Melting Building Materials.[8]

The Flame Spread Classification (FSC) of a specimen is the greatest of FSC_1, FSC_2 and FSC_3.

Care must be taken when comparing the Flame Spread Classification of a product tested in conformance with CAN4-S102-M83 (ceiling-mounted) with that from the American standard tunnel test, ASTM E-84.[A4] In both tests, the advance of the flame front down the tunnel is recorded, but the formulas used to calculate FSC from this information are different. For most building materials, the ASTM formula yields an FSC value about 8% lower than that derived from the Canadian formula; for some materials of very low thermal inertia (good thermal insulators), however, the ASTM figure is much lower than the Canadian one. From the results of corner–wall fire tests, Canadian scientists have argued that the Canadian formulas give a better ranking of lining materials.[A2,A3] Generally, the lower the FSC, the more time there may be to evacuate, should walls become involved in fire.

With thermoplastic materials, or others tested in conformance with CAN4-S102.2-M83 (floor–mounted), it is not possible to compare results with those measured in ASTM E–84, where the sample is mounted in the tunnel ceiling. The performance of such materials in the two tests is markedly different; generally, they perform more poorly in the Canadian test.

In addition to determining FSC's for products, the tunnel is used to determine smoke-developed classifications. These classifications are important in high-rise buildings only.

References

A1. Williamson, R.B., and F.M. Baron, 1973. *A corner fire test to simulate residential fire*, Journal of Fire and Flammability Vol. 4, pp. 99-105.

A2. D'Souza, M.V., and J.H. McGuire, 1977. *ASTM E84 and the flammability of foamed thermosetting plastics* , Fire Technology, Vol. 13, pp. 85-94.

A3. D'Souza, M.V., *The basis for flammability test methods* , Second Symposium on Combustibility and Plastics, The Society of the Plastics Industry of Canada, Ottawa.

A4. Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials, 1986. ASTM E-84, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.07, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 319-336.

Fire Compartmentation and Fire Resistance

David Sanders, M.Sc., M.B.A., P.Eng.

Introduction

In the paper *Flammability of building materials and fire growth*,[1] the development of a typical room fire is described, from the burning of one item (a piece of furniture or wastebasket) to fully developed or post-flashover conditions, when all exposed combustible materials in the room are burning. The measures in the National Building Code of Canada,[2] which are primarily aimed at delaying the onset of flashover, are also presented. However, restrictions on the combustibility and flammability of building materials does not ensure that the fire will not continue to grow beyond flashover; little control currently exists over the flammability of the building's contents (such as furniture and furnishings) and sometimes no one is around to detect or react to fire in its early stage. A recent analysis of data obtained from the National Fire Incident Reporting System indicates that about one out of every four fires will grow to a fully developed stage.

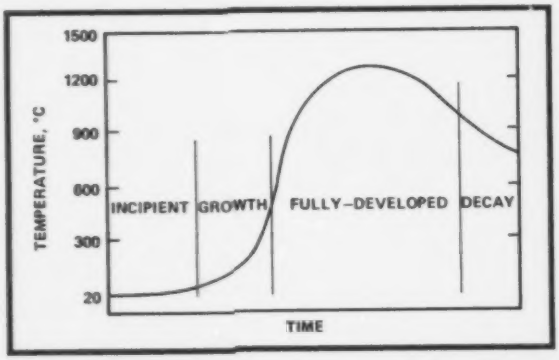
The life safety implications of a potential flashover occurrence must be carefully considered. A fire in its preflashover stage can spread outside the room of origin if some opening such as a doorway or a service penetration is left unprotected. But the danger of fire spreading outside of a room to a corridor and, eventually, to the rest of the building is highest once the fire reaches post-flashover conditions.

This paper deals with fire compartmentation, a fire protection concept used in controlling the hazards associated with a fully-developed fire. It identifies relevant fire safety objectives, describes the concept in practical terms, and outlines acceptable means of evaluating performance. The paper explains the compartmentation concept within the context of the National Building Code's approach to the provision of life safety and gives some examples of the procedure a designer should follow in developing alternative solutions to specific compartmentation requirements.

Fire Safety Objectives

In a fully developed fire, the safety of occupants within the room of origin is no longer an issue. The average temperature would reach about 500°C and quickly peak to levels of 800 to 1200°C, as illustrated in Figure 1. In addition, the amount of vapourized fuel and products of combustion produced by the burning of one piece of furniture (say an upholstered chair) could fill a space equivalent to a 15 000 m³ warehouse in as little as twenty minutes. Thus a sensible fire safety objective could be to contain fire and the superheated products of combustion to the area

Figure 1 Typical compartment fire development



of origin. Alternatively, one could let the fire spread to other portions of the floor area or other storeys in the building, provided measures were taken to prevent its entry into areas declared as safe, isolated zones for the use of occupants. This is shown as controlling the movement of fire, in the Fire Safety Concepts Tree[3] (see Figure 2).

North American building codes actually use both these fire protection measures, containment and isolation, to provide safety for the occupants. Commonly referred to together as fire compartmentation, the measures rely on physical barriers to retard the spread of fire so that occupants may have time to reach a place of relative safety, and fire fighters may respond, set up in a staging area, undertake search and rescue operations, and suppress the fire. In other words, fire spread is controlled by construction to allow other elements in the fire safety tree, such as suppression of fire and management of the exposed, to be achieved. This emphasizes the interrelationship which must exist between the various sub-branches of the tree, in order to improve the reliability of the fire protection system, as discussed by Richardson in his paper *Fire safety, statistics and regulations* .[4]

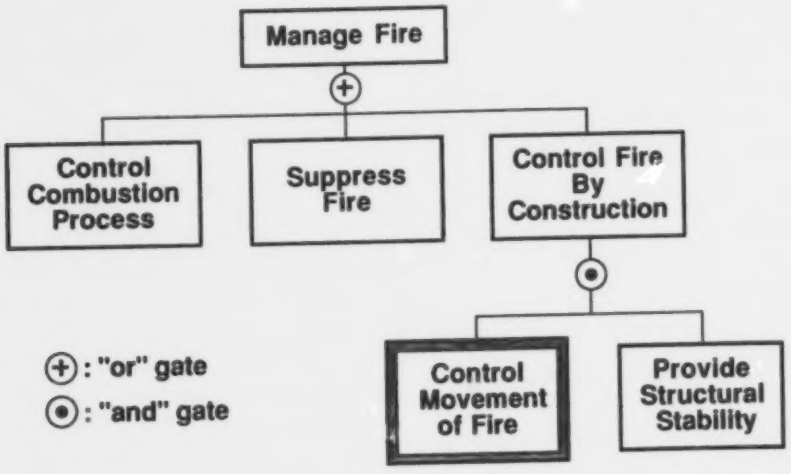
The extent to which compartmentation is required in a building depends on its size, the hazards it contains and the mobility of the occupants, as will be seen later. For now, it is important to understand what a fire compartment means and appreciate the level of performance generally expected from compartment boundaries (walls, floors and roofs).

Definition of Fire Compartmentation

A fire compartment is defined as an area of the building which is totally separated from the remainder of the building by *continuous* construction. This area could be a single room, or a series of rooms, even an entire floor area. Or, it could be a vertical service space or a horizontal service space. If we were to so separate every room or space in a building, we might achieve a very high level of fire safety. However, this would be an expensive solution, which might not be practical or cost effective, at least from a strictly life safety point of view. A more rational approach is to consider the location of each fire compartment as a strategic decision which must be fully compatible with the life safety or property protection goals.

Is the idea of enclosing spaces with continuous barriers a practical one? We know that openings are needed to allow access and egress from the area and to provide electrical, mechanical and plumbing services. In order to ensure the integrity of the fire compartment, it is critical that every opening or penetration through its walls, floor and ceiling, from large openings such as doorways to the smaller service penetrations (wiring, piping, and ducts), be adequately protected to resist the passage of fire.

Figure 2 Control Movement of Fire element, Manage Fire sub-branch of Fire Safety Concepts Tree



The potential impact of inadequate barrier penetrations needs to be assessed in the light of actual fire losses. Fire rarely spreads from one area of a building to another by destroying or burning through a wall or a floor. It usually bypasses these physical barriers, via common concealed spaces in walls or ceilings; heating, venting and air conditioning (HVAC) duct systems; large holes that have been punched through masonry walls to let electrical or communications cables through; doors left open or 'wedged' open. Every one of these openings must be protected to ensure that the fire will be contained to the desired area.

A fire separation is defined as a continuous barrier in which every opening or gap is effectively protected with a 'closure' (a special device or mechanism which blocks an opening, such as a door, wired glass or a rolling shutter) or firestopped with fire-resistant materials. Fire separations, and hence the mechanisms or closures used to protect the openings in the fire separation, are normally required to possess some level of fire resistance, i.e. they must be able to withstand the effects of fire and contain it for a specified period of time. To evaluate the ability of a specific building element or assembly to perform in this respect, small- and full-scale fire resistance tests have been developed; these will be described later.

It must be noted that not all fire separations are required by building codes to possess a fire resistance rating. For instance, noncombustible floor assemblies need not be protected nor rated when used in certain small buildings. They are expected to possess an inherent or nominal resistance to fire which, albeit unmeasured, is considered adequate to ensure the safety of the occupants under those conditions where a complete evacuation of the building requires only a few minutes, say five minutes or less. In other words, life safety can be achieved in small buildings without having to provide additional protection for the floor assemblies. (The owner of the building could choose to have some protection for the floor assemblies so as to minimize property damage and reduce insurance costs. Depending on the size and use of the building, such additional protection could be justified strictly from an economic point of view.)

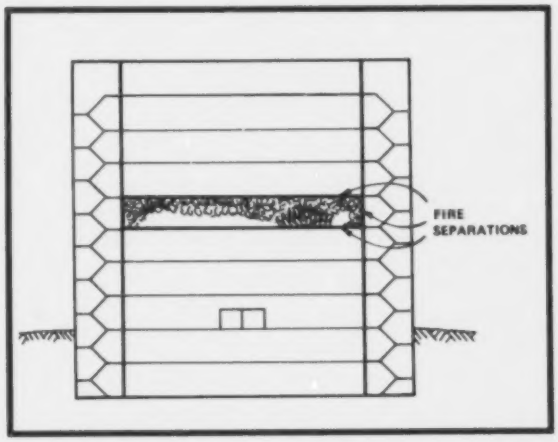
The time required for a complete evacuation of a building will vary according to the number of storeys and the type of occupancy it shelters. For instance, considerably more time is necessary to evacuate a health care facility, in which patients may be partly or totally disabled, than to evacuate an office building of similar size. On the other hand, it could take two hours or more to vacate a high building, depending on how tall the building is and its population density.[5] The evacuation times presented in Table 1 clearly show that it takes much more time to evacuate a high density office building than it does a residential building; this is due to congestion in the exit stairways. One could design larger stairways but, except for small buildings, this would represent an expensive solution.

Table 1 Time required for total evacuation of building population

Building Height	Evacuation Time (min)	
(storeys)	Office	Residential
5	6–12	3–6
15	18–36	9–18
20	24–48	12–24
30	36–72	18–36
40	48–96	24–48
50	60–120	30–60

If stairways are designed to accommodate the evacuation of occupants from one floor at a time, occupants of floor areas above the fire floor will require protection against fire spread for a longer period of time than that afforded by unprotected conventional construction (about ten to twenty minutes). Storey–to–storey compartmentation is normally the best way of providing such protection; all floor/ceiling assemblies are built as fire separations, as illustrated in Figure 3.

Figure 3 Floor-to-floor and exit compartmentation



The level or duration of performance against the effects of fire which is necessary will vary for different buildings. In a low building, such separation need only retard the vertical progression of fire long enough to allow full evacuation of the upper storeys. According to building codes, 45 minutes to one hour is sufficient for this purpose. In higher buildings, the floor separations must be effective for the entire duration of a fire emergency, that is, the time it takes for all the combustible fuel on a floor (furniture and furnishings) to burn out completely or for fire fighters to suppress the fire, since the time needed to fully evacuate the building could exceed the duration of the emergency. The National Building Code of Canada[2] assumes that two hours of fire resistance is adequate protection in such buildings.

Performance Evaluation of Fire Separations

In the late 1800's, building regulations typically consisted of lengthy and cumbersome construction requirements, which specified the types of materials and methods of assembly deemed to afford an acceptable level of fire protection.[6] These requirements were based almost entirely on observations made at fire sites and authorities were reluctant to allow the use of new materials or forms of construction. With increasing pressure from designers and product manufacturers to have new proprietary systems recognized on an equivalent basis with conventional construction, building officials and researchers in Denver and New York city decided to construct kilns on vacant lots and subject representative floor specimens to wood-fueled fires of fairly long durations (typically eight- to 24-hour exposures). As this new evaluation procedure gained widespread acceptance across the United States, the American Society for Testing and Materials (ASTM) created a new committee in 1905 to develop an appropriate fire test standard.

Eventually issued in 1908, the ASTM standard specified acceptance criteria which have remained largely unchanged to this day. These criteria, now specified in Canada in the ULC standard CAN4-S101, Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials,[7] are as follows:

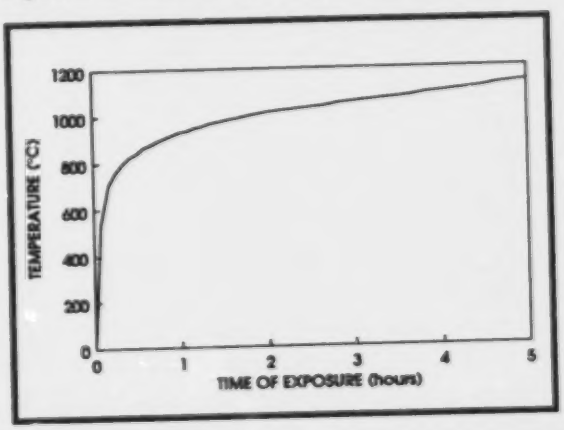
- no passage of hot gases or flames,
- specimen to remain in place under design loads,
- temperature rise on unexposed surface of specimen limited to:
  139°C (average of nine points measured)
  181°C (maximum),
- no passage of hose stream.

A fire-resistance rating for a building assembly, as used in codes, refers to the length of time that a specimen can withstand the standard fire exposure and still meet all of the acceptance criteria noted above. The fire exposure to which the specimens are subjected is defined in terms of a temperature–versus–time relationship, depicted by the curve in Figure 4. The curve was established in 1918 on the basis of maximum temperatures in real fires, observed by using as reference the fusion of materials of known melting points.

The first two criteria used in defining a fire resistance rating are self-explanatory. The temperature rise criterion was added in 1918 to control heat transmission through the assembly, which could ignite combustible materials stored directly against the unexposed floor or wall membrane in the adjacent compartment. The temperature rise limit was originally set at 167°C on the basis of the ignition temperature of cotton waste, but later was reduced to 139°C when it was observed that the temperature at the back of walls continued to increase for a while after the test furnace had been shut down. The last criterion ensures a minimum resistance to the erosion effects of a hose stream that might be directed at the wall during fire fighting.

Since it is also necessary to protect the access and service openings which may be present in floor and wall assemblies, other test methods that utilize the same standard fire exposure

Figure 4 Standard temperature-versus-time curve



have been developed for building components that act as closures or devices to protect the openings. For instance, CAN4-S104[8] applies to the testing of door assemblies, CAN4-S106[9] to window and glass block assemblies, and CAN4-S112[10] to fire dampers used within heating, ventilating and air conditioning ducts where these penetrate a fire separation. Furthermore, a new ULC standard, CAN4-S115 Standard Method of Fire Tests of Firestop Systems,[11] will shortly be referenced in the NBCC for evaluating the performance of devices which are used to maintain the integrity of the fire separation at service penetrations.

An important point to note with respect to closures and firestop systems is that the rating which they must attain is not as stringent as that required for the fire separation in which they are installed. For instance, closures have a fire protection rating that is not only of shorter duration than the fire resistance rating of the floor or wall (Table 2), but is also established without the imposition of the heat transmission criterion which applies to fire separations. This has been allowed primarily for two reasons: first, it is argued that, since an opening serves to allow people access or the passage of service utilities, combustible materials are not likely to be stored directly abutting the opening on either side. Second, closures are normally small and it is considered that fire fighters can deal with small localized fires on the other side of a fire separation.

Table 2 Rating of closures in fire separations*

Required fire resistance rating of fire separation, (h)	Required fire protection rating of closure, (h)
0	0
0.75	0.75
1	0.75
1.5	1
2	1.5
3	2
4	3

*Table 3.1.6.A., National Building Code of Canada[2]

Availability of Fire Resistance Test Results

Since the early twenties, a tremendous number of fire resistance tests have been conducted at laboratories across North America, yielding a wealth of data on the fire resistance properties of materials and assemblies. By and large, these data are available to the design professional through listings of proprietary designs tested at organizations such as:

- Underwriters' Laboratories of Canada[12]
- Warnock Hersey Professional Services Ltd.[13]
- Underwriters Laboratories Incorporated[14]
- Factory Mutual Research Corporation[15].

In addition, where the fire resistance of an assembly clearly depends strictly on the specification and arrangement of materials for which nationally-recognized standards exist, generic fire-resistance ratings have been developed by the Associate Committee on the National Building Code on the basis of supportive test results. These assigned ratings are published in Chapter 2 of the Supplement to the NBCC 1985.[16]

The Supplement contains ratings for a multitude of generic assemblies, such as reinforced concrete floors, walls and columns, masonry walls, wood and steel framed floors and walls, protected steel columns, and laminated timber beams and columns. Since the ratings are intended to apply to all systems and products which fall under the material standard descriptions, the ratings have been assigned on a fairly conservative basis. However, for the Supplement rating to apply in a particular design, all of the applicable provisions and conditions of Chapter 2 must be met. Modifications should not be allowed unless it can be demonstrated, on the basis either of a test or an engineering evaluation, that these modifications will not have a detrimental impact on the fire resistance of the assembly.

Generally speaking, the proliferation of available test results for conventional construction assemblies has been a mixed blessing for the design profession. It certainly has effected substantial savings in construction by dispensing with the need to conduct costly tests each time a new project is considered. However, it has also severely restricted design innovations by enticing engineers to specify designs already tested instead of engineering new systems. It is fairly common practice for the design professionals (architects or engineers) to meet fire resistance requirements by simply verifying that their design is covered by Chapter 2 of the NBCC Supplement or one of the published proprietary listings. But much more could be done with the recent advances made in quantify-

ing not only the expected severity of fire but also its effects on the performance of the structure. Analytical methods currently being developed at research institutions around the world, will allow for the calculation or prediction of the fire resistance of building elements and assemblies. These methods are reviewed in more detail in the paper *Structural fire protection — predictive methods*.[17]

Limitations of the Fire Resistance Test

The standard fire resistance test is often criticized as not representing real-world fires, which can be more or less severe depending on the amount, type and geometry of combustible load (things which can burn) present in the compartment, the availability of fresh air (door and window openings), and the thermal properties of the interior finish materials (Figure 5). Testing each assembly for the various possible fires is not, however, an economically appealing solution. This problem was raised when the standard heat exposure was introduced and, in 1928, some efforts were made by S.H. Ingberg, a U.S. National Bureau of Standards testing engineer, to develop a relationship between the 'standard' fire and real fires.[18]

Ingberg conducted a series of full-scale room burns with the combustible content selected to be representative of typical office, record storage and residential occupancies. On the basis of these tests, in which room temperatures were recorded as a function of time, Ingberg proposed the equal area hypothesis to compare the severity of a real fire to that of a standard fire of specified duration. The hypothesis, illustrated in Figure 6, essentially states that the severities of the actual and the test fires can be considered similar if the areas under their respective temperature–time curves above a base level are equal.

Although it has since been shown not to be scientifically correct,[19] Ingberg's rule of thumb relationship between combustible load and equivalent duration of standard fire exposure presented a convenient way of assessing the levels of fire resistance necessary to withstand a complete burnout in a fire compartment (Table 3). The concept was thus readily adopted by code authorities in the 1930's and 40's following the gathering of data on combustible loads in residences, offices, schools, hospitals, stores and manufacturing establishments.[20]

However, the code authorities recognized that fire load data was only one item in the fire safety equation. Other factors, such as the height and area of buildings, the ability of the occupants to evacuate quickly and without assistance, the degree of awareness of fire conditions (being awake or asleep), and fire fighting capabilities, also impact on life safety and influenced the eventual decision regarding the level of fire resistance considered necessary in different types of buildings.

Figure 5 Comparison of typical compartment fires (A and B) and standard fire exposure

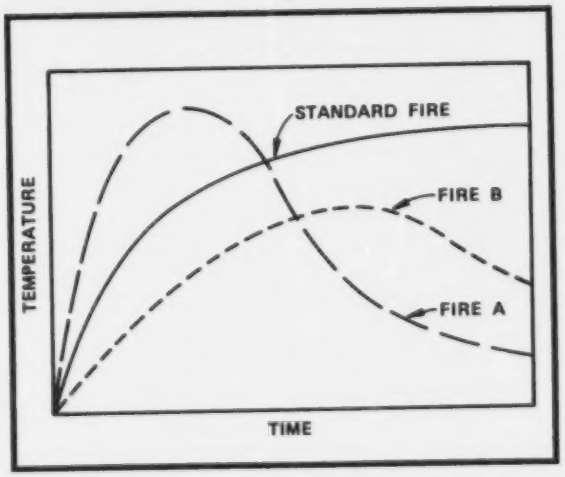


Figure 6 Ingberg's hypothesis – equal fire severities if area A = area B

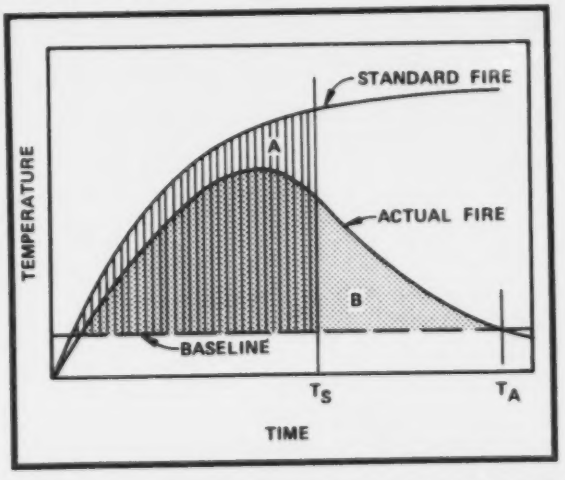


Table 3 Relationship between fire load and fire severity[18]

Combustible content*		Standard fire exposure duration
(lb/ft^2)	(kg/m^2)	(hours)
5	24.4	0.5
7.5	36.6	0.75
10	48.8	1
15	73.2	1.5
20	97.6	2
30	146.5	3
40	195.3	4.5
50	244.1	6
60	292.9	7.5

* Expressed as equivalent weight of wood (with respect to calorific value) per unit area of floor surface.

Use of Compartmentation in the NBCC

As mentioned earlier, the National Building Code of Canada utilizes compartmentation to accomplish one of two objectives: *contain* a specific fire risk within a compartment, and thereby protect the occupants in the rest of the building; or *isolate* the occupants within a particular compartment (or refuge area) from adjacent spaces that may be contaminated by smoke or involved in fire. An example of containment is the requirement that high hazard industrial occupancies (Group F, Division 1) be separated from the remainder of the building or that service rooms, refuse chutes and transformer vaults be enclosed in one-, two- or three-hour fire separations, depending on the particular risk involved.

Isolation is utilized, among other applications, for the exit system within the building (including exit stairs), which is required to be separated from the remainder of the building (as shown in Figure 3). In a hospital, operating rooms and intensive care units must be enclosed in rated fire separations to avoid having to move the patients hastily in case of a fire emergency in an adjacent area.

It should be emphasized that, when using isolation, we are protecting the occupants within the compartment from a potential external threat and not the other way around (containing the threat to its area of origin). This is quite important when investigating alternative ways of meeting the intent of the requirement. For instance, sprinklering the compartmented area may help protect lives or property when containment is the objective of the compartmentation requirement, since the sprinkler system deals directly with the fire risk. The same sprinkler would offer little protection where the compartment was intended for isolation, since the fire hazard would be located outside of the compartment and could overtake a sprinkler system located strictly inside the compartment by the time it breached the fire separation.

Table 4 lists seven instances in the NBCC where the compartmentation concept is applied. Also indicated for each application is the objective(s) of the requirement. The reader is encouraged to consider each objective and the corresponding requirement in terms of either containment or isolation.

Table 4 Major compartmentation requirements in the National Building Code of Canada

Article	Requirement	Objective(s)
3.1.3.1.	Separation of Major Occupancies	(1) protect assembled, institutionalized and sleeping occupants from adjacent hazards (2) contain mercantile and industrial fire risks
3.4.4.1.	Separation of Exits	(1) protect evacuating occupants from fire hazards on adjacent floors (2) provide fire fighters safe access to fire floor
3.2.2.X.	Separation of Floors	(1) provide occupants above fire floor time to reach area of safety (2) control fire size (prevent conflagration)
3.2.6.6. 3.3.3.5.	Separated Zones Within Floor Areas	(1) control fire size when fire compartment is too large and fire fighting is difficult (3.2.6.6.) (2) provide occupants of fire floor more time to evacuate when vertical evacuation is difficult (3.3.3.5.)
3.2.6.2. 3.2.8.4. 3.3.3.8.	Separated Areas of Refuge	(1) provide safe holding areas when: (a) "high" building smoke control option is used (3.2.6.2.) (b) floor separation is incomplete and exit capacity inadequate (3.2.8.4.) (c) evacuation is impracticable (3.3.3.8.)
3.3.1.1.	Separation of Suites	(1) provide occupants in adjacent suites more time to become aware of fire and evacuate
3.5.2.X. 3.5.3.X.	Separation of Hazardous Spaces	(1) contain hazards created by: (a) service equipment (3.5.2.X.) (b) continuous service spaces (3.5.3.X.)

Development of Equivalencies

Understanding clearly the intent of a code requirement is the first and most crucial step in the development of an equivalent solution. Equivalencies to code requirements are allowable under Subsection 2.5 of the NBCC, if it is demonstrated that the solution offers at least the same level of safety as the code solution.

The intent of a requirement can be broken down into two components: a fire safety objective, and the level of performance expected from the solution or measure used to meet the objective. Although knowledge of the specific fire safety objective for a particular requirement is the crucial first step in developing equivalents, such objectives are rarely stated explicitly in the Building Code. The Commentary on Part 3 of the NBCC[21] is an explanatory document which helps identify some of the Code objectives. However, a detailed analysis of the application of a fire protection concept (such as the one presented in this paper) is sometimes the only way of identifying the specific fire protection issue(s) underlying a code requirement. For example, Table 4 represents an attempt to clarify the fire safety objectives of the fire separation or compartmentation requirements of the NBCC.

Once the objective has been properly identified, alternative design solutions can be developed which specifically address the fire hazard underlying that objective. The designer must be prepared to find or generate the documentation (including calculations, statistics, etc.) which shows that the solution proposed can be as effective and reliable as the code solution.

For example, a potential equivalent might be to find another way of dealing with the hazardous substances normally found in janitors' closets. The Code requires that these closets be separated from the remainder of the building and be equipped with at least a heat detector to warn building occupants if a fire starts inside one of them. The objective of that fire separation requirement is to contain the fire long enough to permit the safe evacuation of occupants on that floor. As only a heat detector is required to detect the fire, a certain time delay is implied by the Code solution. The use of a quicker (and reliable) detection system could ensure an earlier initiation of evacuation. It may be possible to show that the time for detection can be sufficiently reduced to permit the total evacuation of the floor area before the fire has a chance of breaking out of the closet, even if the fire separation around it has no rating.

Another equivalency example arises when a designer proposes to specify a properly designed sprinkler system within a contained area deemed hazardous and required by the Code to be compartmented by rated construction. The designer may be able to demonstrate that the sprinkler system will effectively address the identified fire risk (i.e., lessen the fire exposure) and justify a decrease in the level of fire resistance required for the enclosing fire separation.

In all equivalency cases, it is important to make a judicious evaluation of the situation, indicating that the hazards have been (a) properly identified, (b) assessed as to their relative risk, and (c) adequately addressed by the proposed design solution (at least to an extent equivalent to that of the Code solution).

Conclusion

Building codes contain many requirements for fire separation which essentially call for the compartmentation of a building into smaller cells that are more manageable from a fire safety point of view. Compartmentation is used to either contain a fire or isolate occupants within a protected area in an attempt to achieve a uniform level of safety in all buildings.

For the concept to work, the compartment boundaries need to possess an adequate level of fire resistance, which will vary according to the circumstances, including the building size and type of occupancy. Similarly, every opening and penetration through these boundaries requires adequate protection in the form of a rated closure or firestop system.

A clear understanding of the specific objective for each fire separation requirement should open the way for ingenious designers to devise equivalent ways of satisfying not only the minimum life safety objective of a code but also the optimal property protection dictated by the economics of the situation.

References

1. Mehaffey, J. R., 1987. *Flammability of building materials and fire growth*, Proceedings of Building Science Insight '87, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 28277, pp. 21–33.

2. National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23174, 454 p.

3. Coté, A.E. and J.L. Linville (eds.), 1986. Fire Protection Handbook, 16th Edition. Systems Concepts for Building Firesafety, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp.7-10 to 7-19.

4. Richardson, J. K., 1987. *Fire safety, statistics and regulations*, Proceedings of Building Science Insight '87, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 29277, pp. 1–8.

5. Galbreath M., 1969. *Time of evacuation by stairs in high buildings*, Fire Fighting in Canada, Vol.13, No.1, pp. 6-10.

6. Shoub, H., 1961. *Early history of fire endurance testing in the United States* , Fire Test Methods, American Society for Testing and Materials, STP 301, Philadelphia, PA, pp. 1–9.

7. Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials, 1982. Underwriters' Laboratories of Canada, ULC Standard CAN4-S101, Scarborough, Ontario, 41 p.

8. Standard Method for Fire Tests of Door Assemblies, 1980. Underwriters' Laboratories of Canada, ULC Standard CAN4-S104, Scarborough, Ontario, 14 p.

9. Standard Method for Fire Tests of Window and Glass Block Assemblies, 1980. Underwriters' Laboratories of Canada, ULC Standard CAN4-S106, Scarborough, Ontario, 8 p.

10. Standard Method of Fire Tests of Fire Damper Assemblies, 1982. Underwriters' Laboratories of Canada, ULC Standard CAN4-S112, Scarborough, Ontario, 16 p.

11. Standard Method of Fire Tests of Firestop Systems, 1985. Underwriters' Laboratories of Canada, ULC Standard CAN4-S115, Scarborough, Ontario, 19 p.

12. List of Equipment and Materials, 1986. Volume II Building Construction, Underwriters' Laboratories of Canada, Scarborough, Ontario, 709 p.

13. Fire Laboratories Listings, 1986. Warnock Hersey Professional Services Ltd., Coquitlam, B.C., 339 p.

14. Fire Resistance Directory, 1987. Underwriters Laboratories Incorporated, Northbrook, IL, 750 p.

15. Approval Guide 1985. Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, 535 p.

16. Supplement to the National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23178, 278 p.

17. Gosselin, G. C., 1987. *Structural fire protection — predictive methods* , Proceedings of Building Science Insight '87, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 28277, pp. 45–62.

18. Ingberg, S.H., 1928. *Tests of the severity of building fires*, NFPA Quarterly, Vol. 22, No. 1, pp. 43–61.

19. Harmathy, T.Z. and T.T. Lie, 1970. *Fire test standard in the light of fire research* , American Society for Testing and Materials, STP 464, Philadelphia, PA, pp. 85–97.

20. Ingberg, S.H., Dunham, J.W. and J.P. Thompson, 1947. *Combustible contents in buildings*, Building Materials and Structures Report BMS 149, National Bureau of Standards, Washington, D.C.

21. Commentary on Part 3 (Use and Occupancy) of the National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, to be issued in 1988.

Structural Fire Protection – Predictive Methods

David Sowby, M.Sc., M.B.A., P.Eng.

Introduction

As the words 'structural fire protection' imply, this paper addresses the design of the structural system of a building in such a way that its primary loadbearing members will not collapse prematurely in the event of a fire. Important aspects of this discussion include the specific fire safety objectives that can be pursued by providing structural fire protection, a clear understanding of how much protection is needed to fulfill those objectives, and what means are available to ensure that a proposed design provides the necessary level of fire resistance.

This paper also reviews the basis for the structural fire protection requirements contained in the current edition of the National Building Code, as well as the special structural provisions that apply to major fire separations used to subdivide large buildings.

Fire Safety Objectives

An early motivating factor in making structural building elements more fire resistant was undoubtedly the unacceptable economic loss resulting from the structural collapse of fire-struck buildings.[1-4] Although it was recognized that publicly-mandated code provisions could not "legally control construction, except as they relate to the safety, health, or welfare of those in or about buildings" and, specifically, could not "legally...require good building practice on purely economic grounds, desirable though this may be" minimum requirements aimed at preventing collapse were considered legally justifiable, if only to protect the investment of adjacent property owners.[1] This notion gained momentum early in the 20th century as building heights soared to so-called 'skyscraper levels'. Understandably, the idea of a 50-storey building collapsing on adjacent properties and in the streets did not appeal to the general public, which sought the enforcement of measures to ensure that the structural frame or 'shell' of a high building remained standing following a fire.

Property protection objectives hence played an important role in the early requirements for structural fire protection. As the years passed, however, relaxations in the required levels of fire resistance were rationalized on the basis of the confidence gained through fire testing of full scale construction assemblies, experimental work conducted by the National Bureau of Standards[5] on the expected intensity and duration of building fires, and actual field experience. Meanwhile, the issue of the safety of fire fighters and building occupants surfaced as the primary objective of minimum code requirements. But why would one expect these people to be in danger? Are the flammability and compartmentation control measures of the code (described in other BSI lectures[6,7]) not sufficiently effective?

The answer to these questions is that a rated fire separation or barrier to the spread of fire can only be as effective as the structural assembly that supports it. There would be little sense allowing a two-hour rated floor assembly to be supported by unprotected beams and columns that might collapse as quickly as ten to twenty minutes following flashover in the compartment directly below the floor assembly.

The Fire Safety Systems Tree developed by NFPA[8] takes into consideration the fact that the Control Fire by Construction objective or sub-branch can be satisfied only if both the movement of fire is controlled (by barriers such as fire separations) and structural stability is provided. This is illustrated by the *and* gate above these two elements of the tree, as shown in Figure 1. One of the fire safety objectives of structural fire protection thus consists of ensuring that rated fire separations can perform their fire barrier function for a certain period of time. Consequently, all the factors which play a role in the assessment of the fire resistance rating considered necessary for the fire separation (relative mobility and alertness of the occupants, anticipated combustible loads, specific occupancy hazards, etc.) apply equally to the rating of the supporting structural members. These are discussed extensively in *Fire compartmentation and fire resistance* .[7]

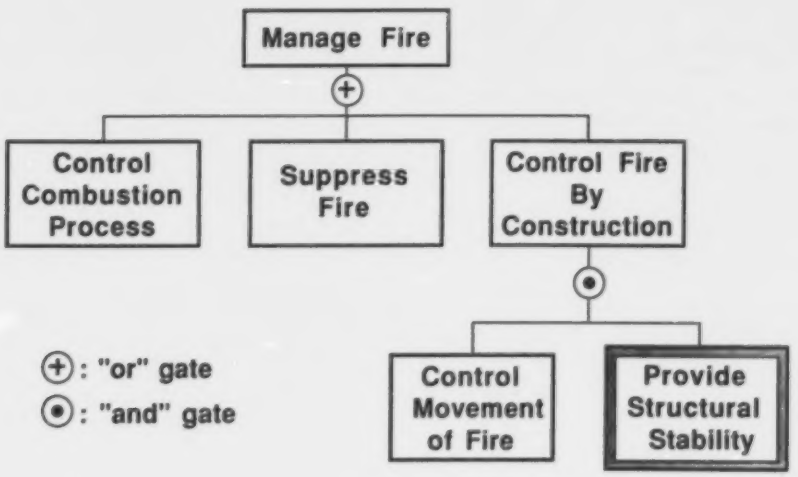
The role of structural fire protection can be expressed by one or more of the following fire safety objectives:

- provide *sufficient* time for occupants on the floors above the fire floor to reach an area of safety;
- support the fire separations necessary to control the overall size of the fire and prevent conflagration;
- minimize potential damage to adjacent properties.

The word 'sufficient' in the first objective is emphasized to indicate that the required level of performance (degree of fire resistance) will vary according to design circumstances. With current technology, the collapse of a member subjected to the effects of a fully developed fire may be delayed a few minutes, a few hours or indefinitely. Delaying collapse indefinitely (in essence, preventing it) is not always necessary. For instance, small buildings from which occupants can escape rapidly in the event of a fire may not require any special protection against collapse and their design will still satisfy the objective of life safety. Whether structural fire protection should be considered for these buildings, and to what extent it should be provided, becomes a decision that is based strictly on the economics of the situation (i.e., comparing the capital and business investment value to the cost of providing the structural fire protection).

In a larger building, or one where occupants may have difficulty evacuating, the time required for a complete evacuation will be longer. Also, fire fighters will be expected to enter the building, assist in the evacuation and attempt to extinguish the fire. Collapse must be delayed by providing a higher level of structural fire protection in order to ensure the life safety of occupants and fire fighters. However, it may still be economically acceptable to incur the financial loss associated with the destruction and collapse of the building, once everyone has safely evacu-

Figure 1 Provide Structural Stability element in Manage Fire sub-branch of Fire Safety Tree.



ated. Again, the level of protection above the minimum needed to satisfy the life safety objective will depend on economics.

When the height or occupancy of the building is such that total evacuation is not possible, collapse of the primary structural members must be prevented for the period of the fire emergency and beyond. Although this necessitates a level of protection which will also decrease property losses, it may not guarantee that damage to the structure will be repairable. Again, negotiations between the owner, insurer and designer will dictate whether it is cost effective to provide structural fire protection to a level that ensures the building can be quickly rehabilitated.

Building Code Requirements

Requirements contained in building codes, such as the National Building Code of Canada (NBCC),[9] represent the minimum levels of fire safety deemed acceptable to society. They are predicated primarily on the basis of public safety, not property protection.

The codes normally require that loadbearing elements and assemblies (walls, columns and arches) have a fire resistance rating at least equivalent to that required for the supported assembly (floor or roof), for the reasons explained earlier. In the NBCC, a minimum level of structural fire protection is generally not required for one- and two-family dwellings, since it is expected that their occupants can escape before any structural element will collapse. In buildings up to five or six storeys in height, where a normal evacuation process is anticipated (e.g., in most assembly, residential and office buildings), a fire-resistance rating of three quarters of an hour or one hour is usually required, to allow sufficient time for a complete evacuation of the building. For higher buildings, and others such as hospitals, theatres and correctional institutions, which cannot be evacuated quickly or easily, a two-hour fire resistance rating is deemed sufficient protection. Three-hour ratings are only required for large buildings containing a hazardous fire load (mercantile, high hazard industrial, and medium hazard industrial occupancies). The ratings also depend to some extent on fire suppression capabilities (the degree of fire fighting access to the site and whether or not the building is sprinklered).

The highest fire-resistance rating (four hours) required in the NBCC is for firewalls adjacent to a high hazard occupancy. A firewall is a heavy fire separation of masonry or concrete intended to prevent fire from spreading between adjoining buildings. To that end, a firewall is required to possess sufficient structural stability to ensure that the collapse of a floor or roof during a fire in one of the adjacent buildings will not cause the collapse of the firewall. Hence, if a two-hour rated floor is attached or supported by a four-hour firewall, the connections must be designed so that the floor assembly may collapse without affecting the structural integrity of the firewall.

Fire Resistance of Conventional Building Systems

Structural systems can be made fire resistant by increasing member sizes (structural overdesign), by encasing the structural element in an insulating material of low thermal inertia, or by protecting the entire assembly or system with an insulating membrane. The type of protection best suited for a particular system depends primarily on the type of material used in its construction, as each material behaves differently under elevated temperatures. This section presents a brief synopsis of the important design parameters affecting fire resistance, as well as the most common types of protection for concrete, steel and wood structural systems.

Concrete Construction

Reinforced and prestressed concrete systems are rarely protected externally, since concrete is normally made of inorganic materials having low thermal conductivity and heat capacity (i.e., concrete is a fairly good insulator). However, concrete gradually loses its compressive strength under increasing temperatures[10] (Figure 2) so one must make sure that members have been designed with sufficient reserve strength to support the applied loads for the projected duration of fire exposure.

Another important design consideration consists of making sure the steel reinforcement (embedded in the concrete) is sufficiently insulated, since steel loses considerable tensile strength at elevated temperatures.[11] The critical temperature of steel is defined as the temperature at which only 60% of the original strength remains, at which point failure is imminent under full design loads (the safety factor has been reduced to one). For regular reinforcing steel, the critical temperature is 538°C, whereas for prestressing steel bars, which are made of high carbon, cold

drawn steel instead of low carbon, hot-rolled steel, the critical temperature is significantly lower at 427°C.[12] The time it will take for these temperatures to be reached in a concrete member (slab, beam or column) depends on the thickness of concrete cover protecting the steel.

As concrete is a fairly good insulator, it does not take a thick cover to restrict the steel reinforcement temperature to below critical levels. Figure 3 shows the temperature gradient in a 150 mm concrete slab after a two-hour standard fire exposure.[12] Notice that the temperature of the concrete 50 mm from the fire-exposed surface is only 340°C, or 33% of the furnace temperature (1010 C).

The degree of restraint against thermal expansion, which every concrete member will undergo as its temperature increases, and the degree of continuity provided by the structural system at the supports, will also affect fire resistance.[13] Both are generally regarded as being beneficial insofar as concrete members are concerned. Restraint against expansion, illustrated in Figure 4a, sets up additional compressive stresses which, when accounted for in the design, reduce the tensile forces that are initially resisted by the reinforcing steel in the bottom half of the member. Continuity (Figure 4b) enables a certain amount of stress redistribution to take place before excessive rotation develops at the supports and midspan, causing the collapse of the assembly. In a statically determinate (simply-supported) structure (Figure 4a), excessive rotation need only occur at one point (usually midspan) for failure to occur.

Steel Construction

Steel, like concrete, has the advantage of being noncombustible, but this characteristic alone means little in trying to resist collapse. Its high thermal conductivity makes steel absorb heat much more quickly than other materials; thus if the structural member has a relatively small mass, its temperature will increase very rapidly. Both the yield stress and modulus of elasticity of steel, the two material properties most important in determining load-carrying capacity, decrease considerably with increasing temperatures (Figure 5).[12] At a temperature of 593°C, these values will have fallen by at least 40% compared to ambient room temperature levels, meaning that the strength of the steel member will be barely sufficient to resist applied loads (assuming normal safety factors).

The mass–to–heated perimeter ratio for a steel structural member is a good indicator of its inherent fire resistance. A heavy steel column can absorb considerable heat and not reach its critical temperature before 30 to 40 minutes of exposure to a fully developed fire. On the other

Figure 2 Effect of temperature on compressive strength of concrete (from Malhotra, 1956)

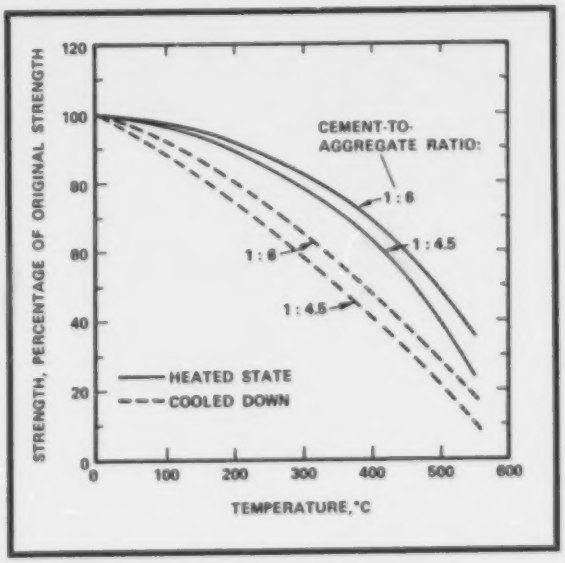
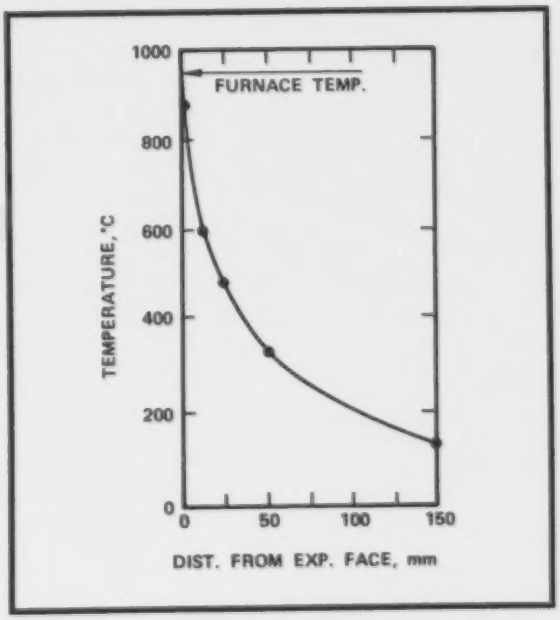


Figure 3 Thermal gradient in a 150-mm-thick concrete slab after two hours of standard fire exposure (Reproduced with permission from the Fire Protection Handbook, 16th edition © 1986, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269)



hand, open web steel joists and other lightweight types of steel construction may fail within five to ten minutes of exposure to the same fire.

In order to achieve fire resistance ratings of one hour or more, a steel member must be protected by an insulating skin which will keep its temperature below the critical point. Early in this century, encasements in concrete, brick, clay tiles, lath and plaster, and similar materials were commonly used for this purpose.[3] Now, less expensive forms of protection have been developed, such as cementitious coatings and sprayed-on mineral fibres, which can be applied directly on the steel members. Some intumescent paints and epoxy coatings have also been used to improve the fire resistance of steel members. These coatings swell and form an insulating layer around the member when subjected to heat. However, they are generally more expensive than other forms of protection.

As an alternative to encasement and surface treatments, the use of a suspended ceiling or protective membrane has been a common means of protecting steel floor and roof assemblies. The membrane usually contributes between 85 and 90% of the fire resistance of such assemblies; thus the type, thickness and fastening of the membrane are the most important design parameters. Lath and plaster, gypsum wallboard panels and inorganic acoustical tiles supported on a metallic-grid system are the most popular membrane ceilings. They can be attached directly to the underside of steel framing members or hung with wire hangers from either the floor deck or the framing members. This allows flexibility in the depth of the concealed space, which is often used for electrical, plumbing and mechanical services. For these protective ceilings to be effective, however, it is critical that all service penetrations be adequately protected or fire stopped and that the integrity of the membrane not be destroyed during maintenance work in the concealed space. Also, when acoustical tiles are used on a metal grid system, they must be tied down with special clips so they will not be uplifted by the positive pressure which may be created by a fire.

A final aspect to consider when using steel in construction is its significant coefficient of linear expansion under thermal loads. At temperatures of up to 1000°C, it is given as:[14]

$$\alpha = (0.004T + 12) \times 10^{-6}$$

where α = coefficient of thermal expansion, in degrees Celsius^{-1},
T = temperature in degrees Celsius.

If the structural member is axially restrained against displacement (as a column is), the expansion due to heat will be translated into thermal stresses that will increase the overall stress level in the member and cause an earlier collapse. Without axial restraint, a steel member will expand and could set up eccentric loading of adjacent structural members by displacing one of their ends (for example, a beam displacing the top of a column or of a loadbearing masonry wall), as illustrated in Figure 6. Good fire protection engineering dictates that either thermal expansion be prevented by limiting steel temperatures, or its effects on the structure be accommodated in the design.

Figure 4 Effects of restraint and continuity on fire resistance

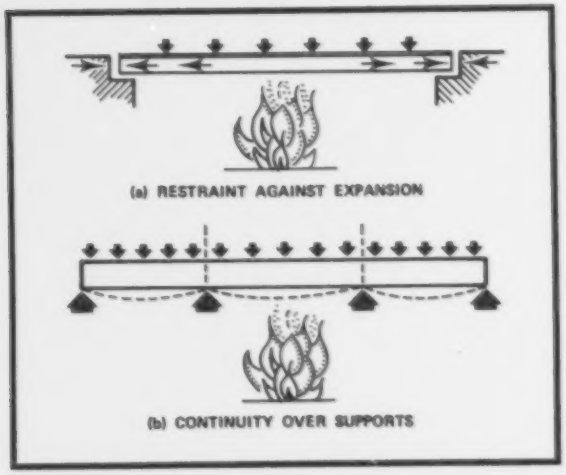
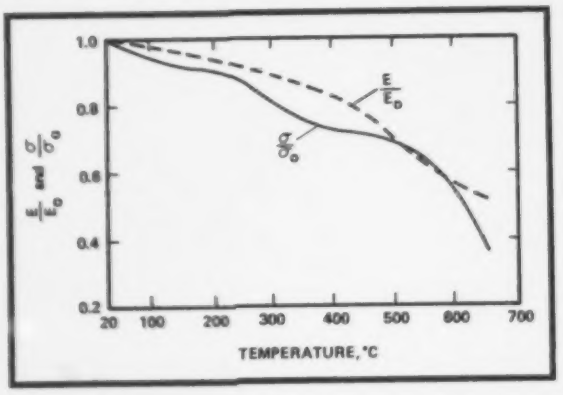


Figure 5 Effect of temperature on modulus of elasticity (E) and yield stress (σ) for A36 steel. E_o and σ_o represent ambient conditions (Reproduced with permission from the Fire Protection Handbook, 16th edition © 1986, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269)

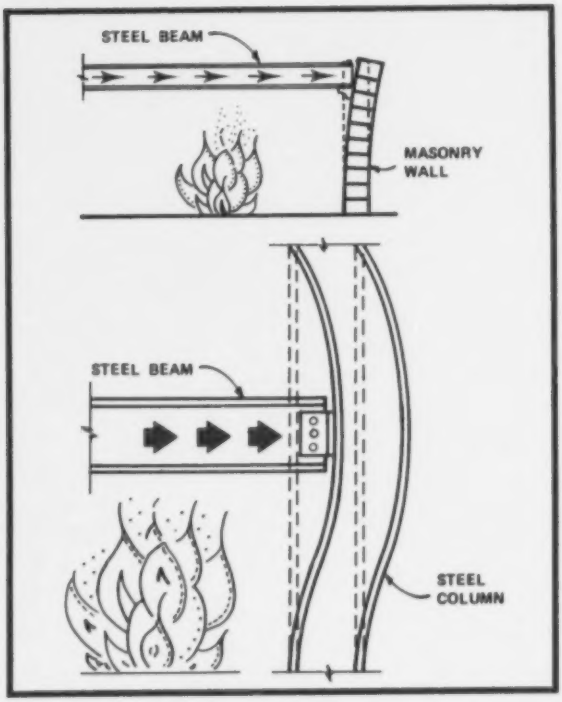


Wood Construction

Wood has the major disadvantage of being combustible. However, this does not mean that wood construction is less safe than steel or even concrete construction. For instance, if tested without a ceiling membrane, a conventional wood joist floor system can withstand the standard fire exposure of CAN4-S101[15] (Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials) for at least fifteen minutes, whereas a conventional open web steel joist system would fail in less than ten minutes. The burning of wood produces a charred layer on the surface of a member, which acts to insulate the unburned wood from the heat being radiated by the flames. This slows down considerably the rate of charring, which will be relatively constant throughout the fire. The rate of charring varies according to the wood species and moisture content but is roughly 0.6 mm/min. for thick members.[12]

Wood also has a very low thermal conductivity, which means that the inside of a wood member is little affected while the outside surfaces burn. In fact, a fair correlation exists between the strength of a burning member and its reduced cross-sectional area. The charred layer is presumed to have no strength, while the uncharred wood suffers a strength loss of only 10-15%.[16]

Figure 6 Thermal expansion of fire-exposed members



The term 'heavy timber construction' refers to a combustible type of construction that utilizes large members which can burn for a significant period of time before their cross-sectional areas are reduced to the point of collapse. By carefully specifying minimum sizes for each critical component, building codes often consider heavy timber construction as equivalent to three-quarter-hour rated combustible construction.

As with steel construction, wood floors and roof systems can acquire considerable fire resistance if the wood framing members are protected with an insulating membrane of lath and plaster or gypsum wallboard. The membrane can be fastened directly into the wood frame, provided the fasteners are sufficiently long to dissipate heat into the wood and prevent local charring that might cause them to pull out. Wood columns can be protected by intumescent coatings, gypsum board, or other mineral fibreboard developed specifically for the purpose. Although fire retardant treatments (surface applied or pressure impregnated) may delay ignition and therefore slow down the spread of flame along the treated wood members, they generally do not affect the rate of charring under fully-developed fire conditions and, hence, they do not increase the fire resistance of wood members.

Determination of Fire Resistance

With recent inroads made at research institutions around the world, there are now three different ways of determining the fire resistance rating of structural members and assemblies. By far the most common method consists of conducting a fire test on a loaded specimen in accordance with a nationally-recognized standard, such as CAN4-S101 (Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials) or of simply looking up published listings of test results and conforming to the specifications of a tested assembly. The second design approach makes use of empirical equations that correlate the results of fire tests for specific combinations of construction material/protection material. Due to the high costs of conducting full-scale fire tests, many such equations have been developed in the last fifteen years to extend the usefulness of test results.

Currently, scientists at the Fire Research Section of the Institute for Research in Construction and other institutions are developing theoretically-based approaches, often referred to as 'rational' design procedures, which rely on structural mechanics and heat transfer prin-

ciples to assess structural response under fire conditions. These represent the newest design approach and open the way to an entire field of design possibilities.

Each of these three design approaches are explained and their strengths and weaknesses briefly described, to help designers in selecting the method that best addresses their needs.

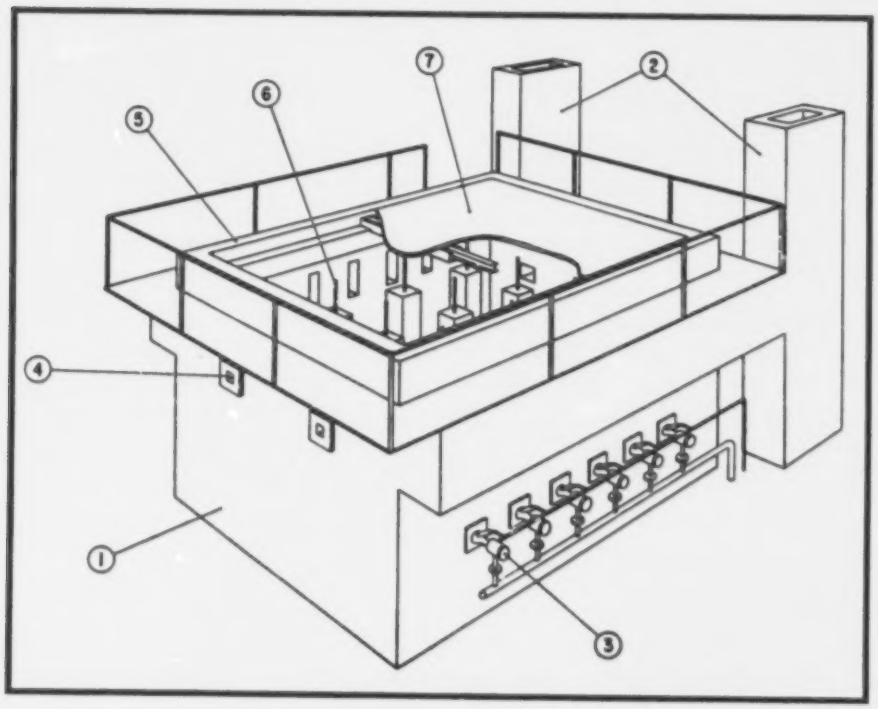
Fire Resistance Testing

Since the early 1920's, the conventional way of designing for fire resistance has consisted of having a standard fire test performed on a specimen representative of the construction assembly. Furnaces have been developed for the testing of floor and roof assemblies (Figure 7), walls and partitions (Figure 8) and structural columns (Figure 9). The column furnace at IRC is unique in Canada and is the only one in North America which is equipped to apply eccentric loads on specimens.

For structural members, the standard CAN4-S101 normally calls for testing under full service load conditions expected in the field, but testing at lower loads, which has the general effect of increasing fire resistance, is allowed provided the restricted load condition is clearly indicated. The standard specifies in detail the preparation, conditioning and instrumentation of test specimens. Conditioning at the specified relative humidity is critical to ensure consistency of the test results, as the moisture content of a specimen usually has a significant effect on fire resistance due to the high heat absorption capacity of the dehydration process.

End restraint conditions of the specimen also influence performance during the test.[15] Appendix A to CAN4-S101 defines a thermally restrained condition as one in which expansion or rotation at the supports is resisted by forces or moments external to the element (usually by the test frame). An unrestrained condition arises when the specimen is free to expand and rotate at its supports, simulating a statically determinate design in practice. Testing under restrained conditions usually imparts additional fire resistance to a load-carrying assembly, so the test result should be applied only to design cases where it is expected the same degree of restraint will occur at the supports of the assembly. In cases of doubt, the conservative approach would be to assume no restraint and to conduct the tests accordingly.

Figure 7 Schematic of floor furnace (from Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials) 1 – furnace, 2 – flue, 3 – gas burners, 4 – observation ports, 5 – restraining frame, 6 – thermocouple tubes, 7 – specimen



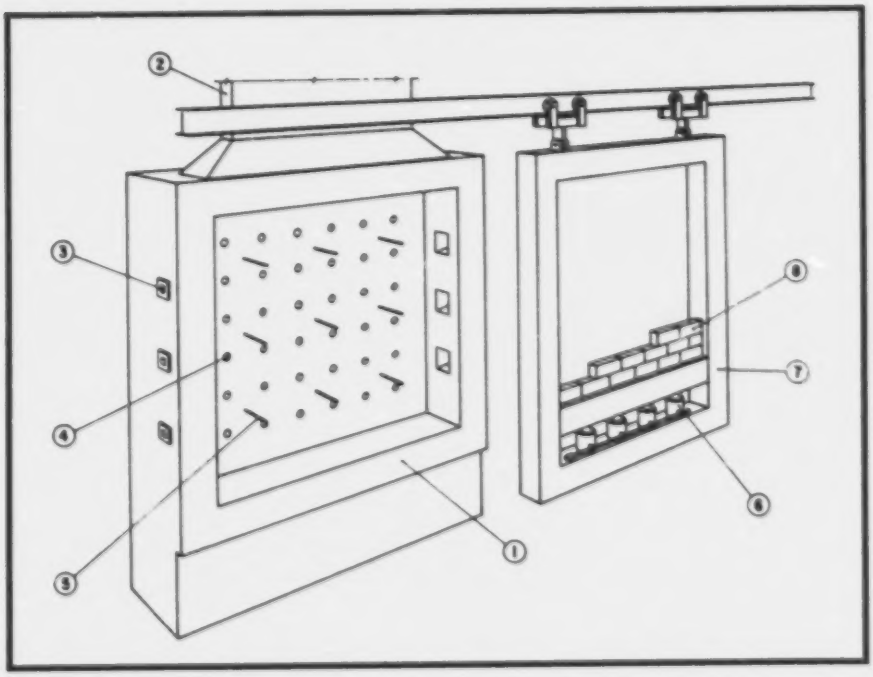
It must be appreciated that the fire resistance rating is the time during which the specimen can withstand the standard fire exposure, while meeting all relevant test criteria. However, if the function of the structural member or assembly is strictly to carry load and not to prevent the spread of fire, then the only applicable test criterion is to continue to sustain the applied loads (resist collapse) for the duration of exposure. In actual field conditions, the same member or assembly may collapse much sooner or much later than the test duration owing to differences between the test and real world fire exposures[17] and to differences in workmanship, loading, and end boundary conditions.

This is not to suggest that results from fire tests are useless. On the contrary, the code approach of requiring that testing be done according to standardized conditions has produced a consistent measure of the relative fire performance of construction assemblies within a regulatory context whose effectiveness depends on ease of enforcement. Notwithstanding its deficiencies, this approach has contributed a great deal toward the provision of fire safe construction in our modern cities.

The tremendous number of fire resistance tests has yielded a wealth of data on the fire resistive properties of materials and assemblies which are available to the design professional. Listings of the results of tests conducted on proprietary designs are available in North America from testing and certification organizations such as Underwriters' Laboratories of Canada, Warnock Hersey Professional Services Ltd., Factory Mutual Research Corporation and Underwriters Laboratories Inc. In addition, the Supplement to the National Building Code of Canada[18] contains a compilation of fire resistance ratings applicable to generic assemblies. These ratings have been developed by a technical committee on the basis of an analysis of test results.

The greatest disadvantage of this conventional design approach is that designers must conform to every essential detail of the tested assemblies for the fire resistance ratings to be applicable in actual construction. A modification in the design requires testing of a new specimen or a detailed engineering evaluation to show that the proposed modification will not be detrimental to the fire resistance rating of the assembly. This situation has severely restricted structural

Figure 8 Schematic of wall furnace (from Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials). 1 – furnace, 2 – flue, 3 – observation ports, 4 – gas burners, 5 – thermocouple tubes, 6 – loading jacks, 7 – restraining frame, 8 – specimen



design innovation by enticing the design professional to specify already-tested designs instead of engineering new systems.[19]

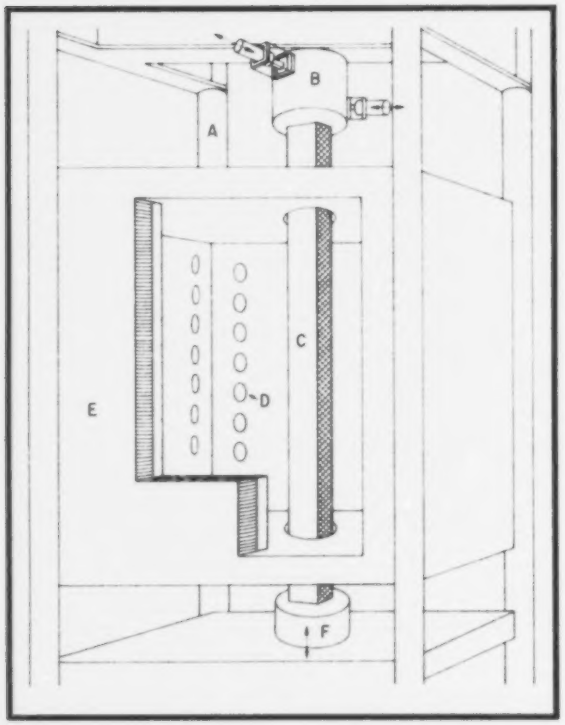
Empirical Methods

Empirical equations presenting correlations of fire resistance test results with important design parameters started to emerge in the late 1960's when sufficient test results became available to quantify the effects of critical parameters. Some of these equations were developed on the basis of theoretical predictions, which were themselves validated by test results.

The important points to consider in assessing the appropriateness of using one of these equations are:

- the scope of the database used to validate the empirical relationships,
- the level of confidence in the calculated results, and
- the applicability of the established relationships to the specific materials and products used in actual construction.

Figure 9 Schematic of column furnace. A – restraint frame, B – transverse loading head, C – test column, D – burner, E – insulated furnace shell, F – axial loading arm



A narrow database will seriously limit the usefulness of the empirical equation, as only a limited range of design parameter values will be available to the designer. Applying the equations to design conditions outside the tested range (extrapolation) should not be undertaken without a thorough fire engineering evaluation. The number of test results used in the establishment of the empirical relationship should also be considered to evaluate the confidence level one can place on the predicted results. A much higher level of confidence would ensue if ten or twenty results have been used, as opposed to only four or five. A statistical analysis of the results should be carried out and predictions corresponding to a confidence level of around 90% might be used in the absence of a better criterion. Finally, care should be taken to ensure that the proposed construction materials (such as the sprayed-on material for protecting a steel member) are similar to the ones tested in all important aspects, such as adhesion, resistance to cracking or spalling and thermal conductivity.

With these words of caution, a few empirical equations will be presented for illustrative purposes.

(a) For laminated timber beam and column members:[18,20]

$R = 0.1\ fB\ \{4 - 2(B/D)\}$ ... beams; 4-sided exposure

$= 0.1\ fB\ \{4 - (B/D)\}$ ... beams; 3-sided exposure

$= 0.1\ fB\ \{3 - (B/D)\}$ ... columns; 4-sided exposure

$= 0.1\ fB\ \{3 - 1/2(B/D)\}$ ... columns; 3-sided exposure

where R = fire resistance, in minutes,
f = load factor (see Figure 10),
B = smaller dimension of beam or column, in millimetres,
D = larger dimension of beam or column, in millimetres,
k = effective length factor,[21]
L = unsupported column length, in millimetres.

The above equations are based on an assumed charring rate of 0.6 mm/min., and include a load factor which gives some credit to the overdesign of members for the purposes of obtaining 'reserve' strength during fire exposure.

(b) For reinforced concrete columns:[18,22]

R = (t/75f) - 1 ... lightweight concrete; rectangular column
= (d/90f) - 1 ... lightweight concrete; round column
= (t/100f) - 1 ... normal weight concrete; rectangular column
= (d/120f) - 1 ... normal weight concrete; round column

provided c = 25 R if R ≤ 2 hours
= 25 + 12.5 R if R > 2 hours

where R = fire resistance rating, in hours,
t = smaller dimension of rectangular column, in millimetres,
d = diameter of round column, in millimetres,
f = load factor (see Table 1),
k = effective length factor,[23]
L = unsupported column length, in metres,
p = area of vertical steel reinforcement as a percentage of column area,
c = minimum thickness of concrete cover over vertical steel reinforcement, in millimetres.

These equations take into account seven design parameters: the size and shape of the column, its effective length, the type of concrete, the percentage of steel reinforcement, the thickness of concrete cover over the steel reinforcement and the degree of overdesign. The effective length of the column affects fire resistance because 'short' columns fail by crushing of the concrete (compressive failure), whereas longer columns fail by lateral buckling, and different mechanical properties govern each mode of failure. The type of aggregate used in lightweight concrete (e.g., expanded clay, shale or slag) is superior to that used in normal weight concrete under elevated temperatures. As a result, lightweight concrete retains more of its strength and has a lower coefficient of thermal conductivity.

Credit is given to more heavily reinforced columns (p > 3%), as they are slightly more stable under fire exposure. This effect is independent of the degree of overdesign, which also imparts more fire resistance to a concrete column. Finally, the thickness of concrete cover controls the rate at which heat is conducted to the main steel reinforcement, as noted earlier.

Figure 10 Load factor as a function of slenderness ratio and overdesign (from the Supplement to the National Building Code of Canada 1985)

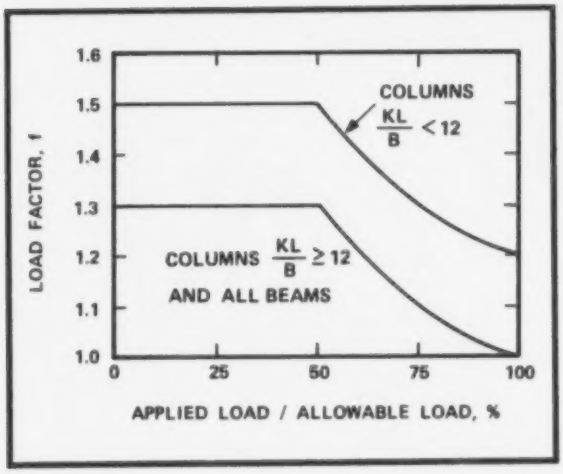


Table 1 Load factor for reinforced concrete columns

Overdesign factor*	Load Factor f		
		3.7 m < kL ≤ 7.3 m	
	kL ≤ 3.7 m	t ≤ 300 mm and p ≤ 3%	all other cases
1.00	1.0	1.2	1.0
1.25	0.9	1.1	0.9
1.50	0.8	1.0	0.8

*Overdesign factor is the ratio of the calculated loadbearing capacity of the column to the column strength required to carry the specified loads determined in conformance with CAN3-A23.3.[23]

(c) For protected steel beams and columns:[24,25]

$$R = [C_1 (M/D) + C_2]\, t$$

where R = fire resistance, in minutes,
M = mass of the steel member, in kilograms per metre,
D = heated perimeter of member, in millimetres,
t = thickness of insulation material, in millimetres,
C_1, C_2 = empirical constants for the insulating material (see Table 2).

Table 2 Empirical constants for two types of steel insulating material

Insulating material	Density range ρ (kg/m³)	C_1*	C_2
Mineral fibres, vermiculite and perlite	32-80	806/ρ	1.17
Cementitious materials	32-80	806/ρ	2.81

*The value of C_1 depends on the actual density (ρ) of the insulating material.

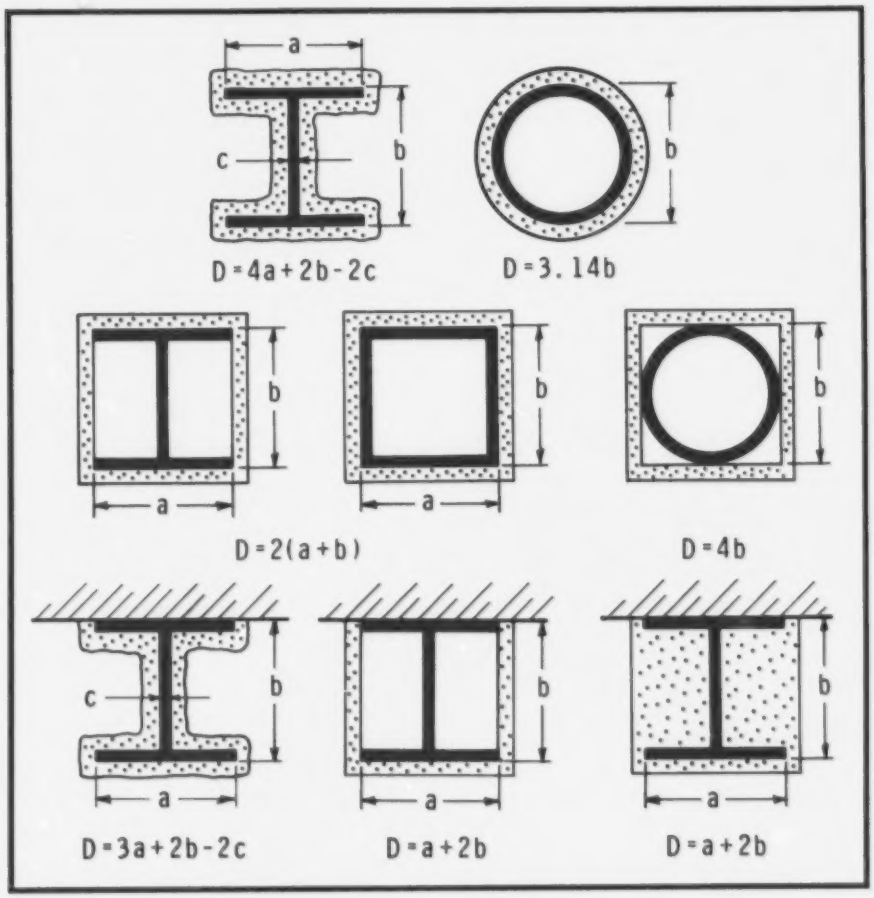
As mentioned previously, the mass–to–heated perimeter ratio of the steel column is an important design parameter for fire resistance. The greater the mass, the greater the volumetric heat capacity, i.e., the more heat required to raise the average column temperature. The heated perimeter (D) provides a measure of the total heat flow to the steel member. Typical approximations of D as a function of the column dimensions are shown in Figure 11 for various column shapes and types of protection.

Theoretical Design Approach

In recent years, considerable research has been undertaken with a view to developing analytical methods for calculating the fire resistance of structural elements and assemblies. Procedures are being validated against fire resistance test results for reinforced concrete columns and floor slabs, steel beams and columns protected externally with sprayed-on inorganic materials or gypsum wallboard membranes, and hollow structural steel (HSS) columns protected internally with plain or reinforced concrete or water.

Most calculation procedures are restricted to relatively simple design cases such as concentric loads, pinned ends, or statically determinate

Figure 11 Assumed heated perimeters for various column shapes and types of protection



supports, but experimental work is under way to extend the validity of the predictive algorithms to a wider array of situations including fixed or partially-fixed ends or eccentric loading.

Most of the rational design methods consist of applying the usual structural mechanics design principles with due consideration given to the impact of elevated temperatures on the thermal and mechanical properties of the primary construction materials. Thus, the complete problem of designing for fire resistance can be broken down into three components:

- characterization of the expected fire severity,
- determination of the heat transmission to the building elements,
- evaluation of the strength and deformation characteristics of structural members.

Although these three design components are discussed individually, some structural systems (e.g., wood assemblies) react with fire so that an interdependence between the above components must be accounted for. This is generally done using an iterative process.

Fire severity

Of all the components of fire resistance design, the prediction and appropriate characterization of the severity of a fire to be expected in a particular area of a building is undoubtedly the one which design professionals are most ill-prepared to address. Fire is a complex phenomenon and its understanding requires knowledge of chemical kinetics, fluid mechanics, heat transfer and thermodynamics. Realistically, one cannot expect designers to acquire an in-depth knowledge of all these areas.

Two options are available. The first is to rely on the validity and accuracy of preflashover and post-flashover compartment fire models developed by others. The development of preflashover fire models is not very well advanced, however, so that preheating effects of early fire growth on the performance of a structural member can only be taken into account by making some rough assumptions. By contrast, the development of post-flashover or fully-developed fire modelling is significantly more advanced; certain simplifying assumptions are made that do not greatly alter the accuracy of the results.[26]

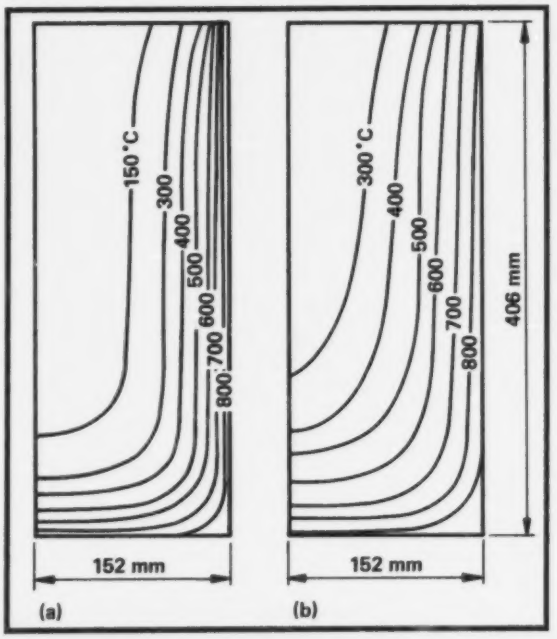
Reasonable accuracy between calculated and experimental results appears to be achievable by some of the models under certain well-defined conditions with respect to quantity and type of combustible load, the presence of openings for ventilation and the thermal characteristics of the finish materials lining the room boundaries.[27] However, the designer's lack of control over some of these parameters dictates that they be carefully selected to reflect the worst conditions likely to occur during the design life of the building. This is not easily done, especially in the case of a speculative building.

The second option open to designers is to utilize a numerical description of the heat exposure conditions prevailing during a standard fire test instead of one describing the expected severity of the real-world fire. Clearly, this is not optimal because an actual fire can follow a temperature–versus–time history quite different from that specified in the standard.[7] Nevertheless, this approach allows a prediction of the fire-resistance rating the structural assembly would achieve if subjected to a standard fire test, a performance measure authorities readily recognize.

Heat transmission analysis

Given a satisfactory characterization of the heat exposure, the designer may then compute how quickly temperatures will increase at various sections within the structural component. Isotherms, or temperature profiles, may be plotted to give an instantaneous picture of the temperature distribution within the member at any given time in the course of the fire (Figure 12).[28]

Figure 12 Typical isotherms for a normal weight concrete beam (304 mm x 406 mm) after a standard fire exposure of (a) 1 hour and (b) 3 hours (from Gustaferro and Lin, 1986)



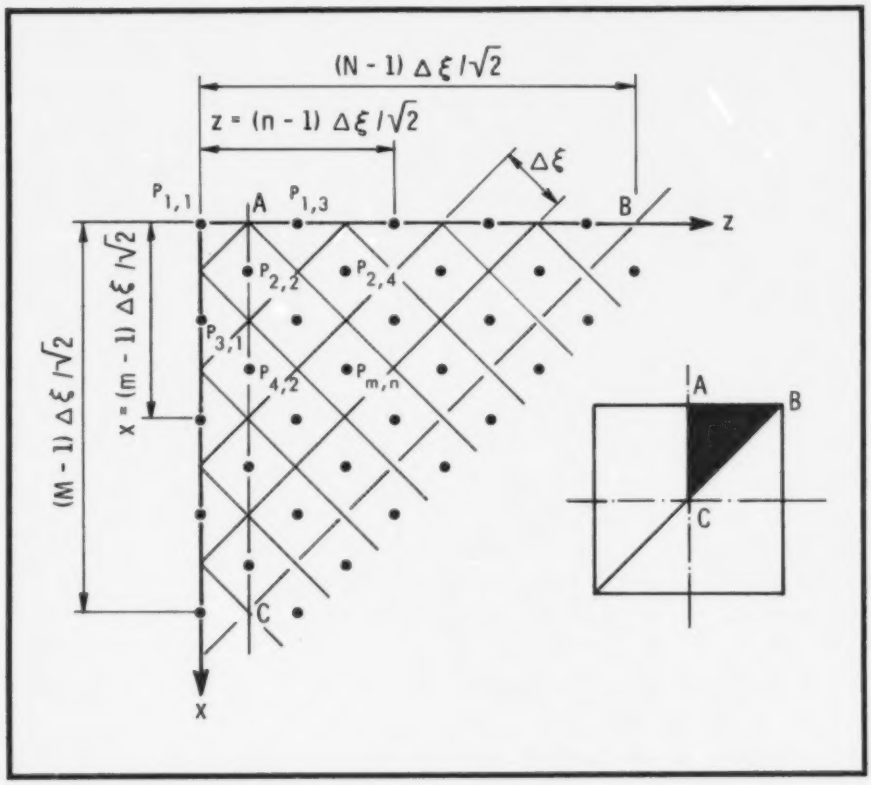
For these calculations, the designer can benefit from the numerical help provided by software specifically developed for this purpose. For example, FIRES-T3 and TASEF-2 are two computer programs for calculating heat transfer from fires to structures.[29,30] Both rely on the finite element technique, one in two dimensions (TASEF-2), the other in three dimensions (FIRES-T3). Computer routines have also been developed based on a finite difference numerical technique.[31] The main difficulty encountered in a heat transmission analysis is the inadequate knowledge of the temperature-dependence of some of the material properties. Still, in simple cases where the structural element is relatively homogeneous (e.g., steel), a great deal of accuracy is possible.

Although some of the software can accommodate different fire exposures, it is more common to utilize the standard temperature–time curve to describe the heat exposure environment, again, to provide a readily recognizable performance measure. Normally, this entails adopting the temperature end-point criteria specified in the test standard as the failure criteria defining the fire resistance of the assembly.

Structural response to elevated temperatures

Utilizing the information produced by the heat transmission analysis and that contained in available databases on material properties, a designer can assemble a picture of the strength and deformation characteristics of a structural member at any given stage of the heat exposure. The stress, stability and deformation analyses normally require, as a first step, the use of a finite element program to define the continuum in terms of smaller, interdependent elements (particularly if the geometry of the structural member is not symmetrical) and account for the non-uniform temperature distribution within the member (as in Figure 13).[14] For each element, the incremental strain or deformation caused by the increase in temperature is calculated and a new stress level obtained with the help of the stress–strain relationship applicable for the temperature in question. Finally, the usual structural mechanics theory can be used to calculate the residual load, shear or moment capacity of the member and compare it with the anticipated applied load (shear forces or moments) to determine whether or not failure is imminent.

Figure 13 Discretization of one-eighth section of a reinforced concrete column into an element network (from Lie et al., Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns)

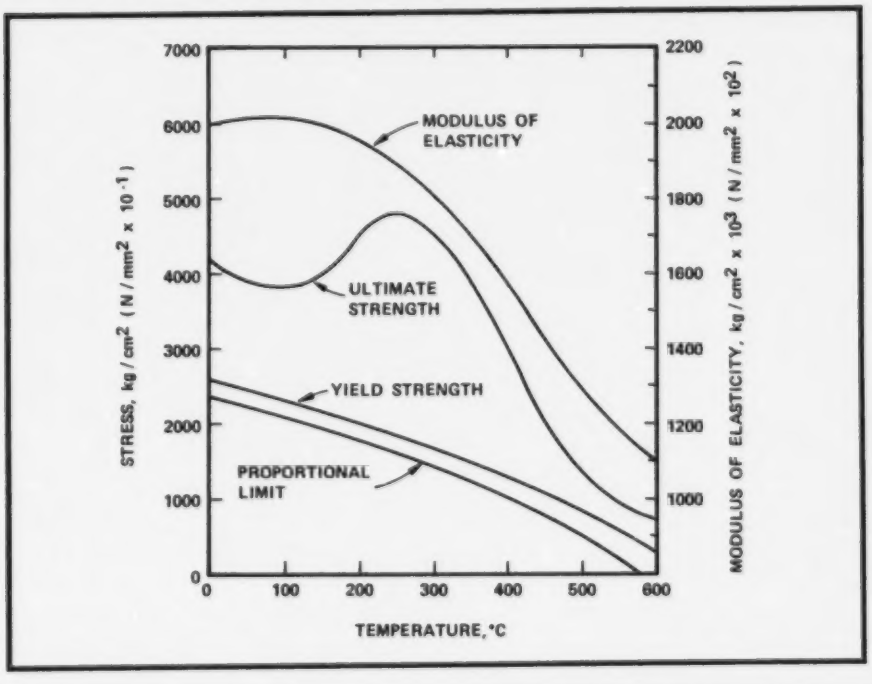


Included in the references and bibliography are documents describing some of the available calculation methods for predicting the fire resistance of structural elements and assemblies.[14,31] The list is far from exhaustive, given the high level of activity in this area around the world. Before utilizing any calculation model on a particular project, the reader is strongly recommended to obtain a copy of the technical paper describing the development of a predictive tool, and study the assumptions made and the extent of validation by tests. This will ensure that the model is valid for the design conditions encountered and that sufficient confidence can be placed in the calculated predictions to justify foregoing full-scale testing.

The most important problem with regards to the use of a theoretical approach is that it requires access to a good database on material properties under elevated temperatures. A knowledge of the thermal and mechanical properties as a function of temperature is critical to the accuracy of the calculation model.

For example, the important mechanical properties for a steel member are the yield stress, ultimate stress, modulus of elasticity, proportional limit and creep parameters. An indication of the variability of the first four of these properties with temperature is shown in Figure 14 for a mild structural steel.[16] The temperature dependence of the yield and ultimate strengths of cold drawn prestressing steel is even more significant (Figure 15).[11] The creep rate of a mild structural steel under a stress of 1500 kg/cm^2 is shown in Figure 16 as a function of temperature.[11] Further data on the effects of temperature on the thermal and mechanical properties of other materials can be obtained[32] but, generally speaking, the database is incomplete. As more elevated temperature measurements are made for different construction materials, the full potential of this design approach will gain significance in practice.

Figure 14 Strength and deformation characteristics of a mild structural steel (St37) as a function of temperature (from Lie, Fire and Buildings)



Conclusions

The advent of taller buildings early in the century created a need to ensure that these structures do not collapse prematurely, or at all, due to the effects of fire. A collapse can be considered premature if it occurs before the desired life safety and property protection objectives are met. From a life safety point of view, the designer must ensure that collapse of primary structural members will not occur before the occupants of the building have had a reasonable chance to reach an area of safety. In high buildings, collapse should not occur at all, since areas of safety must be located in the building. Fire fighters' safety must be ensured to the extent that they are expected to enter a building to save lives.

The ability of a structural member to resist collapse (its fire resistance) depends primarily on the behaviour of its components at elevated temperatures. Organic materials burn, while inorganic ones gradually lose their strength or elongate to the point of failure of the member to support applied loads. Fire resistance can be provided by overdesigning members, so that they will have reserve strength to carry loads, or by protecting them from the heat with materials having low thermal conductivity and good 'stay in place' characteristics.

The measurement or assessment of fire resistance has traditionally been done by subjecting a representative specimen to a standard fire test. Although this technique has provided regulatory authorities with a useful classification scheme and has improved our understanding of the fire performance of various structural systems, its cost has been a major deterrent to design innovation. In the last two decades, empirical and theoretical calculation procedures, which offer an economical alternative to testing, have been developed. Before taking advantage of these new design tools in practice, however, the underlying assumptions and limitations must be carefully understood by the user to ensure that the predictions are indeed applicable to the specific design conditions being considered.

Figure 15 Ultimate and yield strengths of a cold drawn prestressing steel (ASTM A421) as a function of temperature (from Harmathy and Stanzak, 1970)

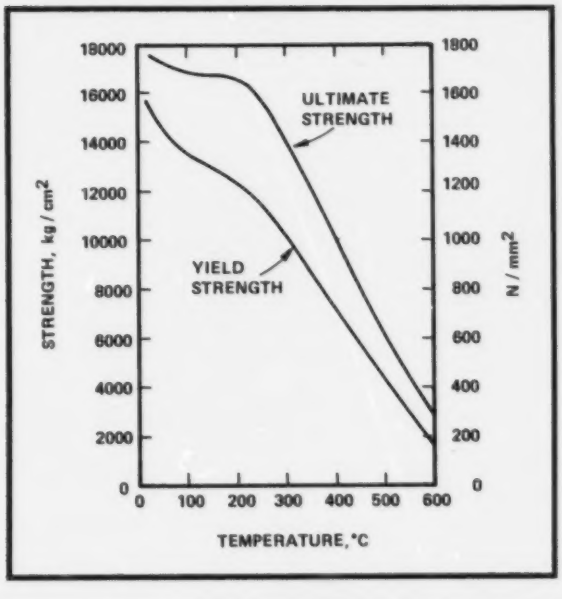
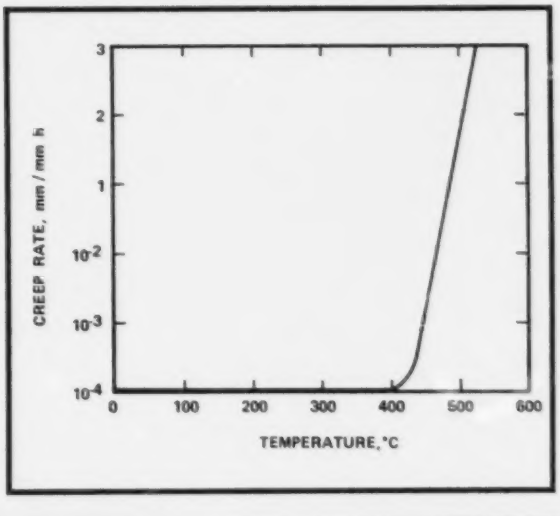


Figure 16 Creep rate of a mild structural steel (ASTM A36) as a function of temperature (from Lie, Fire and Buildings)



References

1. Department of Commerce Building Code Committee, 1931. Recommended Minimum Requirements for Fire Resistance in Buildings, U.S. Department of Commerce, Building and Housing Report No. 14, Bureau of Standards, Washington, DC, 58 p.

2. Subcommittee on Fire-Resistance Classification of the Central Housing Committee on Research, Design and Construction, 1942. Building Materials and Structures, U.S. Department of Commerce, Report BMS92, National Bureau of Standards, Washington, DC, 70 p.

3. Shoub, H., 1961. *Early history of fire endurance testing in the United States,* American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 301 on Fire Test Methods, Philadelphia, PA, pp.1-9.

4. Robertson, A.F. and D. Gross, 1970. *Fire load, fire severity and fire endurance,* American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 464 on Fire Test Performance, Philadelphia, PA, 329 p.

5. Ingberg, S.H., 1928. *Tests of the severity of building fires,* NFPA Quarterly, Vol. 22, No. 1, pp. 43-61.

6. Mehaffey, J.R., 1987. *Flammability of building materials and fire growth,* Proceedings of Building Science Insight '87, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 28277, pp. 21–33.

7. Gosselin, G.C., 1987. *Fire compartmentation and fire resistance* , Proceedings of Building Science Insight '87, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 28277, pp. 35–44.

8. Coté, A.E. and J.L. Linville (eds.) 1986. Fire Protection Handbook, 16th Edition, Systems Concepts for Building Firesafety, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 7-10 to 7-19.

9. National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23174, 454 p.

10. Malhotra, H.L., 1956. *The effect of temperature on the compressive strength of concrete* , Magazine of Concrete Research, Vol. 8, No. 23, pp. 85-94.

11. Harmathy, T.Z. and W.W. Stanzak, 1970. *Elevated temperature tensile and creep properties of some structural and prestressing steels* , American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 464 on Fire Test Performance, Philadelphia, PA, pp. 186-208.

12. Coté, A.E. and J.L. Linville (eds.) 1986. Fire Protection Handbook, 16th Edition, Fire Safety in Building Design and Construction, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 7-82 to 7-108.

13. Reinforced Concrete Fire Resistance, 1980. Concrete Reinforcing Steel Institute, Chicago, IL, 242 p.

14. Lie, T.T., T.D. Lin, D.E. Allen and M.S. Abrams, 1984. *Fire resistance of reinforced concrete columns* , Division of Building Research, National Research Council of Canada, Technical Paper No. 1167, Ottawa, NRCC 23065, 32 p.

15. Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials, 1982. Underwriters' Laboratories of Canada, ULC Standard CAN4-S101, Scarborough, Ontario, 41 p.

16. Lie, T.T., 1972. Fire and Buildings. Applied Science Publishers Ltd., Essex, England, 276 p.

17. Harmathy, T.Z. and T.T. Lie, 1970. *Fire test standard in the light of fire research* , American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 464 on Fire Test Performance, Philadelphia, PA, pp. 85-97.

18. Supplement to the National Building Code of Canada 1985. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 23178, 278 p.

19. Gosselin, G.C. and T.T. Lie, 1987. *Provision of fire resistance -evolution of design approaches*, Proceedings of Canadian Society for Civil Engineering Centennial Conference, Montreal, Quebec, Vol. 1, pp. 3-19.

20. Lie, T.T., 1977. *A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 4, No. 2, NRCC 15946, pp. 161-169.

21. Engineering Design in Wood, 1984. Canadian Standards Association, CSA Standard CAN3-086, Rexdale, Ontario, 206 p.

22. Lie, T.T. and D.E. Allen, 1972. *Calculation of the fire resistance of reinforced concrete columns*, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Technical Paper No. 378, Ottawa, NRCC 12797, 25 p.

23. Design of Concrete Structures for Buildings, 1984. Canadian Standards Association, CSA Standard CAN3-A23.3, Rexdale, Ontario, 281 p.

24. Lie, T.T. and W.W. Stanzak, 1973. *Fire resistance of protected steel columns*, Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Vol. 10, No. 3, NRCC 13516, pp. 82-94.

25. Designing Fire Protection for Steel Columns, 1980. American Iron and Steel Institute, 3rd Edition, Washington, DC, 25 p.

26. Harmathy, T.Z. and J.R. Mehaffey, 1983. *Post-flashover compartment fires*, Fire and Materials, Vol. 7, No. 2, NRCC 22571, pp. 49-61.

27. Mehaffey, J.R. and T.Z. Harmathy, 1985. *Thermal response of compartment boundaries to fire*, Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., NRCC 25920, pp. 111-118.

28. Gustaferro, A.H. and T.D. Lin, 1986. *Rational design of reinforced concrete members for fire resistance*, Fire Safety Journal, Vol. 11, pp. 85-98.

29. Iding, R., B. Bresler and Z. Nizamuddin, 1977. *FIRES-T3 – A computer program for the fire response of structures - thermal*, University of California, Berkeley, Report No. UCB FRG 77-15.

30. Wickstrom, U., 1979. *TASEF-2, A computer program for temperature analysis of structures exposed to fire*, Lund Institute of Technology, Sweden, Report No. 79-2.

31. Lie, T.T., 1984. *A procedure to calculate fire resistance of structural members.* Fire and Materials, Vol. 8, No. 1, NRCC 23574, pp. 40-48.

32. Harmathy, T. Z., 1983. *Properties of building materials at elevated temperatures*, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Paper No. 1080, Ottawa, NRCC 20956, 74 p.

Bibliography

Proprietary design test results

Approval Guide 1985. Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, 535 p.

Fire Laboratories Listings, 1986. Warnock Hersey Professional Services Ltd., Coquitlam, B.C., 339 p.

Fire Resistance Directory, 1986. Underwriters Laboratories Incorporated, Northbrook, IL, 750 p.

List of Equipment and Materials, 1986. Volume II Building Construction, Underwriters' Laboratories of Canada, Scarborough, Ontario, 709 p.

Calculation methods for predicting fire resistance

Barthélémy, B. and J. Kruppa, 1978. Résistance au Feu des Structures Béton-Acier-Bois (Fire Resistance of Concrete-Steel-Wood Structures), Edition Eyrolles, Paris, 277 p.

Bresler, B., 1985. *Analytical prediction of structural response to fire*, Fire Safety Journal, Vol. 9, pp. 103-117.

Byrne, S.M., 1979. *Fire resistance of load-bearing masonry walls*, Fire Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 180-188.

European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures, 1983. European Convention for Constructional Steelwork, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 106 p.

Grandjean, G. and C. Lelong, 1977. *Tenue au feu de profils creux carrés remplis de béton (Fire resistance of concrete-filled square hollow sections)*, Construction métallique, No. 80, pp. 90-116.

Gustaferro, A.H., L.D. Martin and D. Leslie, 1977. PCI Design for Fire Resistance of Precast Prestressed Concrete, Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 81 p.

Jeanes, D.C., 1985. *Computer modeling the fire endurance of floor systems in steel-framed buildings*, Fire Safety: Science and Engineering, American Society for Testing and Materials, STP 882, Philadelphia, PA, pp. 223-238.

Méthode de Prévision par le Calcul du Comportement au Feu des Structures en Acier, 1983. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Document Technique Unifié, Paris, 56 p.

Méthode de Prévision par le Calcul du Comportement au Feu des Structures en Béton, 1980. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Document Technique Unifié, Paris, pp. 43-61.

Pettersson, O., 1976. *Theoretical design of fire-exposed structures*, Lund Institute of Technology, Bulletin 51, Sweden, 34 p.

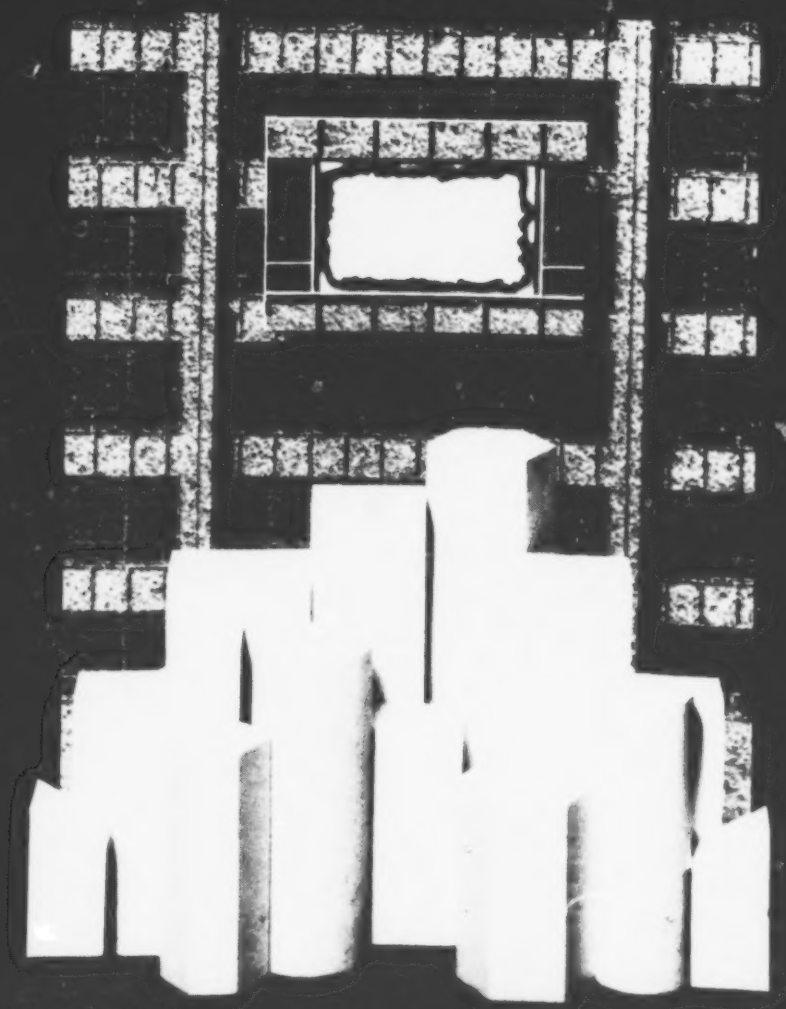
Pettersson, O., S.E. Magnusson and J. Thor, 1976. *Fire engineering design of steel structures*, Swedish Institute of Steel Construction, Publication No. 50, Stockholm, 232 p.

Rudolph, K., E. Richter, R. Hass and U. Quast, 1986. *Principles for calculation of load-bearing and deformation behaviour of composite structural elements under fire action*, Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., pp. 301-310.

Conseil national de recherches Canada
National Research Council Canada

Institut de recherche en construction
Institute for Research in Construction

Conception en fonction de la sécurité incendie



COMPTE RENDU DU REGARD 87 SUR LA SCIENCE DU BÂTIMENT

Canada

REGARD 87

Conception en fonction de la sécurité incendie

La science et son application aux codes du bâtiment

Prix 6,00 $
NRCC 28277F
ISSN 0835-6548
Ottawa, novembre 1987
© Conseil national de recherches Canada 1987

Table des matières

Avant-propos ii

Sécurité incendie, données statistiques et règlements 1

J.K. Richardson, B.Sc., B.Eng., ing.

Combustibilité des matériaux de construction 11

J.R. Mehaffey, Ph.D.

Inflammabilité des matériaux de construction et développement du feu 25

J.R. Mehaffey, Ph.D.

Compartimentation et résistance au feu 41

G.C. Gosselin, M.Sc., M.B.A., ing.

Protection des structures contre le feu – Méthodes de prédiction 53

G.C. Gosselin, M.Sc., M.B.A., ing.

Avant-propos

Voici le compte rendu du Regard 87 sur la science du bâtiment, qui portait sur la conception des bâtiments en fonction de la sécurité incendie; des séminaires d'une journée ont été donnés à l'automne dans dix villes canadiennes.

Un grand nombre de personnes oeuvrant dans des domaines divers participent au processus qui aboutit à la conception d'un bâtiment largement à l'abri des incendies : architectes, ingénieurs en construction, consultants en protection incendie, agents du bâtiment et fabricants de matériaux. Au Canada, le recueil type de dispositions de sécurité incendie dans les bâtiments est le Code national du bâtiment du Canada (CNB).

Le CNB assure un minimum de sécurité incendie en établissant des exigences concernant la combustibilité et l'inflammabilité des matériaux de construction et en prescrivant, lorsque cela est justifié, la compartimentation des bâtiments et la protection des structures contre l'incendie. Cependant, ces dispositions ne constituent qu'un seul moyen d'assurer la sécurité. On peut utiliser d'autres mesures à condition qu'elles reflètent l'esprit du CNB. Or l'interprétation des dispositions du CNB exige une bonne connaissance des principes scientifiques sur lesquels elles reposent. Il arrive souvent que les concepteurs ou agents du bâtiment désireux de trouver des solutions de rechange ne voient pas bien comment les dispositions du CNB contribuent à assurer la sécurité incendie.

Conscient de ce fait, l'Institut de recherche en construction (IRC) a décidé de faire porter le Regard 87 sur la science du bâtiment sur la conception des bâtiments en fonction de la sécurité incendie. L'objectif précis visé était d'expliquer les fondements scientifiques des dispositions du code de façon à ce que les participants, une fois rentrés au travail, soient plus en mesure de jouer leurs rôles respectifs au niveau de l'élaboration de solutions de rechange novatrices et applicables au plan de la conception.

Le Regard 87 sur la science du bâtiment était la 27e édition de séminaires-ateliers annuels donnés par l'IRC depuis 1960. Il a été présenté dans les villes suivantes : Halifax, Moncton, Québec, Montréal, Ottawa, Toronto, Winnipeg, Saskatoon, Edmonton et Vancouver. Environ 1 400 personnes ont participé aux séances, qui consistaient en exposés et en ateliers. Les exposés contenus dans cette publication ont été rédigés par Ken Richardson, Jim Mehaffey et Guy Gosselin, chercheurs de l'IRC; ils les ont présentés en

anglais avec, dans certaines villes, l'aide de John Berndt. Je suis reconnaissant à Jean-Luc Poulin, professeur d'architecture à l'Université de Montréal, ainsi qu'à Luc Saint-Martin et Guy Gosselin, de l'IRC, d'avoir présenté les exposés et animé les ateliers en français à Québec et à Montréal.

Outre les conférenciers, bien d'autres membres de l'IRC ont contribué au succès du Regard 87. Ce sont : Madeleine Fleury et Gail LeBlanc, inscription; Fern Brisebois, voyages et dispositions d'hôtel; Linda Hayes et Anne-Marie Dorais, préparation et publication du compte rendu; Gilles Ouellet et Louise Coutu, traduction; Nicole Paquette, traitement de textes et mise en page; Don Hobbs, Christa Gaudert et Doug Scott, graphisme et diapositives; Alan Dalgliesh, gestion de la qualité; et Jim Gallagher, publicité. Le coordonnateur technique était Guy Gosselin.

L'IRC a toujours considéré le transfert technologique comme étant un élément important de ses programmes. Les séminaires comme Regard constituent à cet égard un moyen d'action efficace, car ils permettent un dialogue en face à face entre les conférenciers et les participants. Les chercheurs de l'IRC, souvent confinés au laboratoire, apprécient cette interaction qui les sensibilise aux problèmes pratiques.

R.G. Turenne

Sécurité incendie, données statistiques et règlements

J. Kenneth Richardson, B.Sc., B.Eng., ing.

Introduction

Au Canada, les dépenses relatives à l'incendie s'élèvent à environ 6 milliards $, dont 2,5 milliards sont attribués aux pertes par le feu et 3,5 milliards au coût de la protection contre l'incendie. Chaque année, le feu fait environ 600 morts et un nombre beaucoup plus grand de blessés graves. Dans quelle mesure les codes et règlements actuels réussissent-ils à limiter ces coûts et à enrayer ces pertes? Existe-il d'autres moyens plus efficaces? Qui a la responsabilité des normes et règlements en matière de protection contre l'incendie?

Au Canada, la sécurité des personnes en cas d'incendie est principalement réglementée par les codes du bâtiment, basés sur le Code national du bâtiment du Canada[1]. La protection des biens contre l'incendie est habituellement une question d'ordre économique; règle générale, les compagnies d'assurance établissent des normes minimales de protection des biens tandis que les codes du bâtiment renferment des exigences visant à prévenir les sinistres d'importance. Le présent exposé traite des objectifs des codes et normes en ce qui a trait aux pertes par le feu et au coût de la protection incendie.

L'un des principaux objectifs du Code national du bâtiment (CNB) est d'assurer un degré minimal de sécurité incendie aux occupants des bâtiments. À cette fin, le Code impose l'utilisation de matériaux de construction incombustibles, ou qui propagent la flamme lentement, ou encore, qui empêchent la propagation de l'incendie. Ces mesures, qui font partie d'un plan d'ensemble en vue d'accroître la sécurité incendie, constituent les principaux sujets du Regard 87 sur la science du bâtiment.

Le présent exposé indique comment on aborde la sécurité incendie au Canada et quels sont les autres moyens qui peuvent être utilisés. Il traite en particulier :

- des données statistiques actuelles sur les incendies à la lumière des mesures de sécurité incendie et des exigences des codes;
- du rôle des règlements du bâtiment au niveau de la sécurité incendie;
- du rôle du Code national du bâtiment, de l'Institut de recherche en construction, des codes du bâtiment provinciaux et des organismes de normalisation et d'homologation;
- d'une méthode intégrée et simplifiée d'analyse de la sécurité incendie, offrant un moyen d'élaborer des solutions de rechange pour assurer la sécurité des occupants.

Données statistiques sur les incendies au Canada

Il est difficile d'établir dans quelle mesure les codes du bâtiment canadiens, les normes des compagnies d'assurances et les autres mesures de sécurité incendie réussissent à réaliser leurs objectifs. L'ensemble des données sur les pertes par le feu[2] représentent la seule mesure qui existe à l'échelle nationale. Ces statistiques incluent les bâtiments de tout âge, et il est difficile d'isoler ceux construits selon les codes et normes les plus récents ou selon les méthodes courantes de sécurité incendie. Cependant, ces statistiques permettent de mieux comprendre la

situation actuelle et de saisir l'importance de la sécurité incendie.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les dépenses annuelles relatives à la sécurité incendie se chiffrent à environ 6 milliards $ et représentent 1,25 % du produit intérieur brut. Quarante pour cent de ces dépenses sont attribuables aux pertes par le feu (pertes de vie, blessures corporelles, pertes matérielles et pertes indirectes) et 60 % à la protection contre l'incendie (protection contre l'incendie dans les bâtiments, services des incendies et autres services reliés aux incendies). Par conséquent, il est dans l'intérêt national de réduire les pertes par le feu et de maximiser les coûts de la protection contre l'incendie. On abordera plus loin les moyens permettant d'atteindre ces objectifs.

La figure 1 contient des informations non publiées, compilées par la Section d'étude du feu de l'Institut de recherche en construction (IRC); elles sont basées sur une étude des incendies aux États-Unis. Des rapports semblables existent sans doute sur les pertes par le feu au Canada. (L'analyse qui suit est fondée sur cette hypothèse.) Un examen minutieux de ces incendies a révélé, suivant certaines hypothèses, que 78 % de ceux-ci ne dépassait pas l'étape qui précède l'embrasement général (extension brutale d'un feu à l'ensemble d'une pièce).

Figure 1 Résultats d'une étude de l'évolution d'un incendie

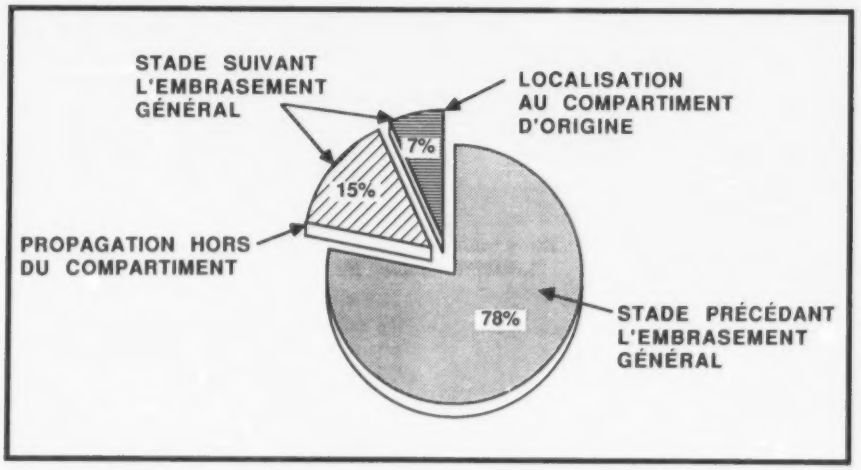
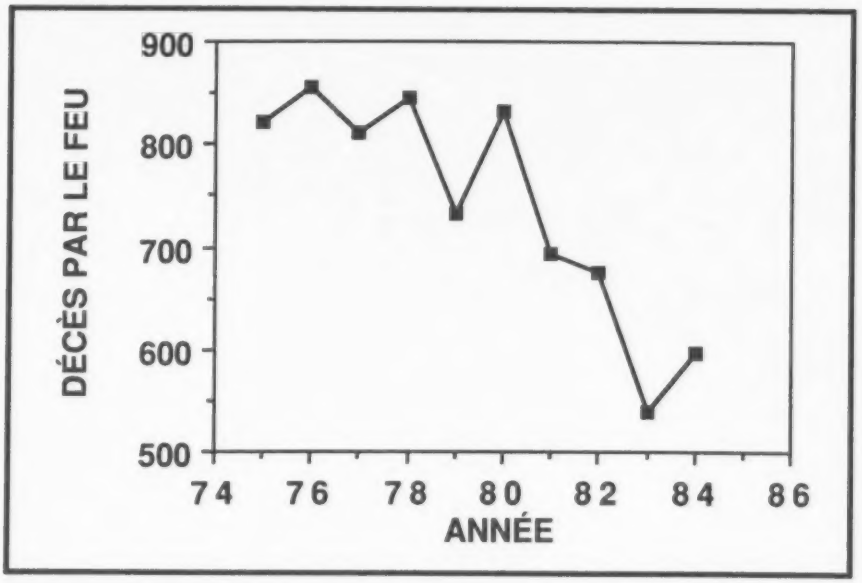


Figure 2 Décès par le feu au Canada, 1975-1984



Les 22 % restants ont atteint le stade qui suit l'embrasement général. Parmi ceux-ci, 32 % ont été circonscrits au compartiment d'origine, c'est-à-dire au local dans lequel l'incendie a pris naissance. Donc, 85 % des incendies étudiés étaient circonscrits au compartiment d'origine et seulement 15 % se sont propagés à l'extérieur du compartiment. Ces derniers présentent le plus grand risque de pertes de vie et de dommages matériels, car ils peuvent s'étendre à l'ensemble d'un grand bâtiment.

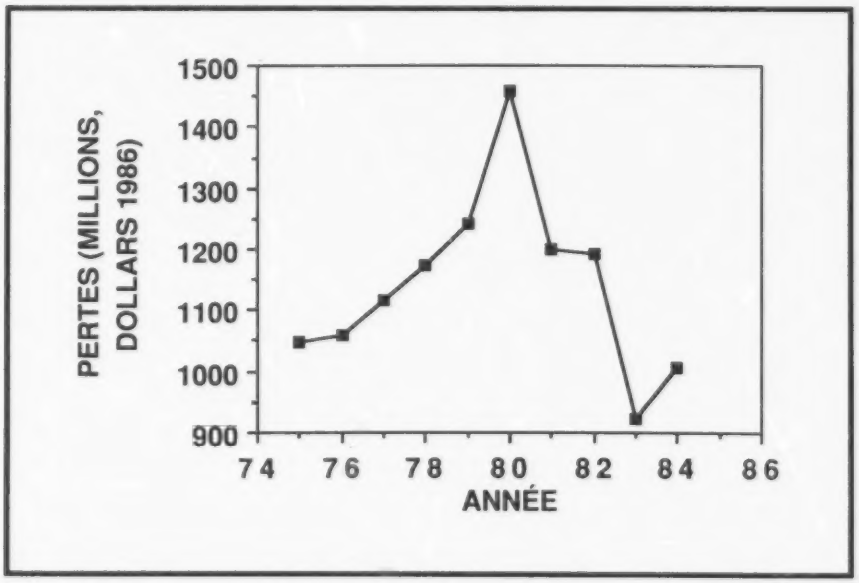
Les pertes de vie et les pertes matérielles au Canada au cours de la dernière décennie sont illustrées aux figures 2 et 3. D'après les données statistiques sur les pertes par l'incendie, 85 % des décès causés par le feu en 1984 se sont produits dans des habitations; or les incendies d'habitations n'ont compté que pour 37 % des pertes matérielles (figures 4 et 5). Soixante-douze pour cent de cette fraction (figure 4) ont péri dans des incendies de maisons de un et deux logements, et dans des maisons mobiles. Ces logements ne possédaient qu'un seul compartiment résistant au feu (car, habituellement, les chambres d'un logement ne sont pas isolées les unes des autres par des séparations coupe-feu), de sorte que ces feux peuvent être inclus dans le 85 % d'incendies circonscrits au compartiment d'origine (figure 1). Dans ce type d'usage, des modifications aux mesures relatives à la maîtrise du processus de combustion (fabrication de meubles plus sûrs) et à l'extinction de l'incendie (réseaux d'extincteurs automatiques à eau d'habitations) seraient celles qui auraient sans doute un plus grand effet. Une méthode d'évaluation de l'impact de telles modifications est proposée plus loin. À ce stade-ci, on constate que le défi qui se pose au concepteur consciencieux est de réduire le risque de pertes par le feu et d'assurer une protection optimale contre le feu sans augmenter les coûts de construction.

Rôle des codes en matière de sécurité incendie

Traditionnellement, les architectes et les ingénieurs canadiens se sont fiés aux codes du bâtiment et aux normes des assurances pour élaborer une conception en fonction de la sécurité incendie. Les codes du bâtiment n'offrent qu'un seul moyen pour atteindre l'objectif en matière de sécurité des personnes en cas d'incendie. Puisqu'ils ne contiennent que des dispositions générales, ils traitent rarement de problèmes spécifiques. Ceux-ci seront plutôt résolus à l'aide d'une méthode intégrée d'analyse de la sécurité incendie dont il sera question plus loin. Étant donné que les codes constituent le principal outil de référence en matière de conception et de sécurité incendie, il est important de comprendre leur rôle dans la solution des problèmes relatifs à la protection contre l'incendie, et les moyens utilisés pour limiter les pertes par le feu.

Les codes, par exemple le Code national du bâtiment, établissent indirectement le degré de sécurité incendie requis en spécifiant les dimen-

Figure 3 Pertes matérielles au Canada, 1975-1984



sions des issues (à partir desquelles le temps d'évacuation peut être calculé), la résistance au feu des matériaux, les techniques d'extinction des incendies et d'autres aspects comme des restrictions sur la charge combustible. D'un point de vue global, ces exigences représentent le degré minimal de sécurité incendie que les législateurs sont prêts à accepter dans les bâtiments construits au Canada. Par conséquent, les concepteurs doivent respecter ce degré de protection pour satisfaire aux objectifs de sécurité incendie contenus dans les codes du bâtiment (dans le CNB, il s'agit surtout de la sécurité des personnes).

Équivalents

Le fait de pouvoir déterminer le degré de sécurité incendie exigé par les codes permet aux concepteurs d'élaborer des solutions qui peuvent différer des exigences du code tout en assurant un degré de sécurité semblable. Ces solutions de rechange sont appelées des *équivalents* et sont souvent utilisées dans les bâtiments complexes ou de grandes dimensions, où il est difficile ou impossible d'appliquer le code à la lettre. Il revient au concepteur de démontrer que l'équivalent proposé remplit les conditions de

Figure 4 Décès par le feu au Canada, 1984, en pourcentage

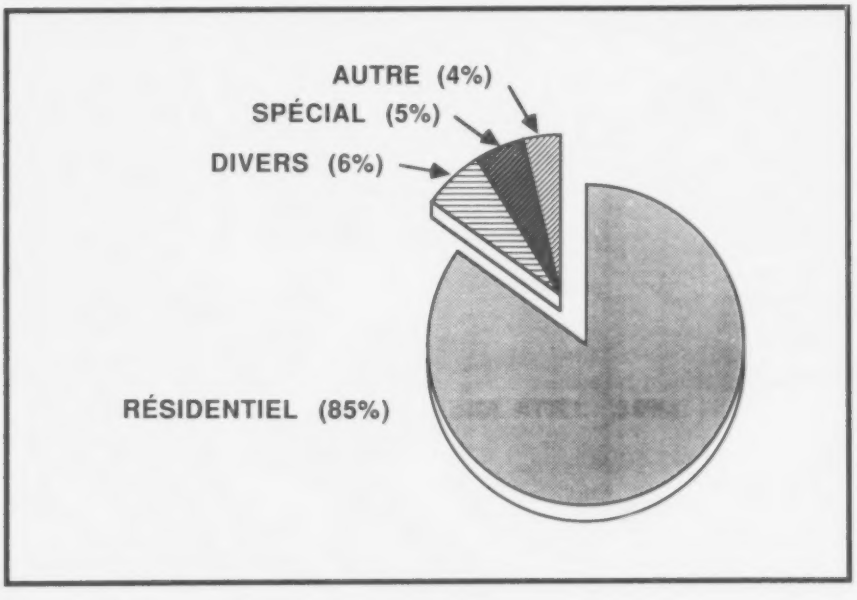
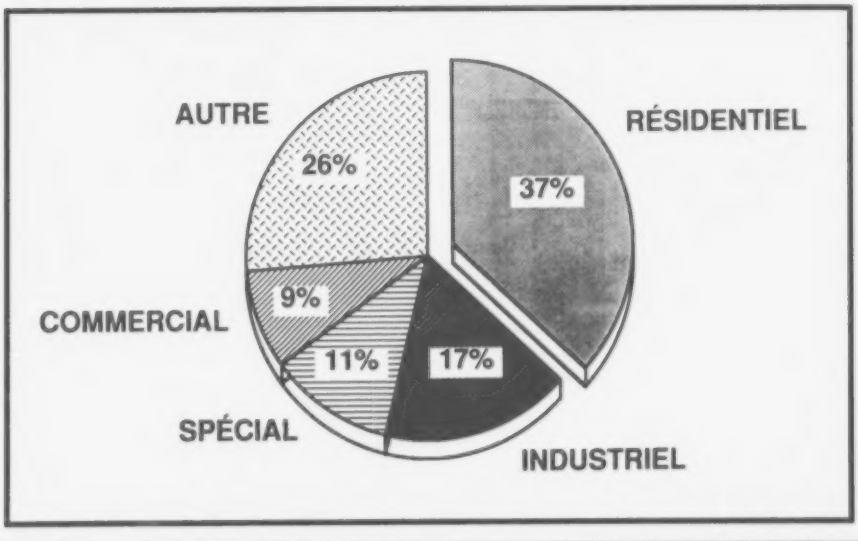


Figure 5 Pertes matérielles au Canada, 1984, en pourcentage



rendement exigées par le code, et aux autorités compétentes de l'évaluer. Cela s'effectue souvent par la présentation et l'évaluation d'une méthode intégrée d'analyse de la sécurité incendie. Des exemples de solutions équivalentes seront présentés dans les autres exposés.

Codes et normes

Avant de discuter d'une méthode d'élaboration de solutions équivalentes, il importe de connaître la base et l'historique des codes canadiens, en particulier le CNB. Avant 1941, la plupart des grandes villes du Canada avaient adopté des règlements de la construction basés sur les codes britanniques et américains. Le gouvernement du Canada demanda alors au ministère des Finances et au Conseil national de recherches d'élaborer des règlements qui puissent être utilisés uniformément dans toutes les régions du Canada. Cette requête faisait suite principalement à la nécessité d'uniformiser les règlements de l'habitation, qui étaient alors la responsabilité du ministère des Finances. C'est ainsi que l'édition 1941 du Code national du bâtiment du Canada a vu le jour.

La préparation du Code national du bâtiment a été confiée au Conseil national de recherches en 1948. Neuf éditions ont été produites par le CNRC, la plus récente étant celle de 1985. Le CNB est publié tous les cinq ans et des modifications sont apportées, au besoin, entre chaque parution.

Après s'être vu confier la responsabilité de rédiger et de mettre à jour le Code du bâtiment, le Conseil national de recherches créa le Comité associé du Code national du bâtiment (CACNB), dont le mandat consiste à élaborer des règlements relatifs à l'hygiène publique, à la protection contre l'incendie et à la solidité des constructions. Bien que ces exigences visent avant tout la sécurité des personnes, certaines dispositions relatives à la protection des biens sont également incluses. Pour aider le CACNB à résoudre les problèmes techniques, des comités techniques ou comités permanents ont été mis sur pied, composés de personnes compétentes dans un domaine technique spécifique. En matière de sécurité incendie, il existe trois comités permanents, soit celui de la protection contre l'incendie, de l'usage des bâtiments et du comportement au feu des matériaux de construction. Les deux premiers sont responsables de la Partie 3 du CNB (Usage des bâtiments), alors que le troisième a la responsabilité du chapitre 2 du Supplément du CNB (Comportement au feu des matériaux de construction).

Règle générale, le CACNB établit les politiques des comités des codes (énoncées dans les Lignes de conduite du CACNB[3]), coordonne les activités des comités et donne l'approbation finale à toutes les modifications apportées au Code et à ses documents connexes. Chaque comité permanent est responsable du contenu technique dans le domaine particulier qui lui incombe. La composition des divers comités est variée et équilibrée, les membres provenant de l'industrie, d'organismes de réglementation et d'autres milieux.

Le personnel de l'Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches fournit l'aide technique et s'occupe du secrétariat, sous la direction du CACNB. Les problèmes techniques soulevés par l'élaboration et la révision du Code sont souvent soumis à l'IRC pour fins d'examen, en vue de fournir aux comités les renseignements les plus récents sur la technologie et la protection incendie dans le domaine de la construction. La Section d'étude du feu a effectué de nombreuses recherches et la majeure partie des résultats de ses travaux a servi à l'élaboration des exigences du CNB. Le personnel de l'Institut agit seulement en qualité de conseillers techniques ou de secrétaires auprès des comités; il n'a aucun droit de vote dans les réunions des comités.

Le CNB constitue un recueil type d'exigences techniques n'ayant qu'une valeur indicative tant qu'il n'a pas été adopté par une autorité juridictionnelle. Puisque les règlements de la construction sont de juridiction provinciale, il revient aux provinces et territoires d'adopter le CNB et de lui donner force de loi. Certaines provinces possèdent leurs propres règlements basés sur le CNB; certaines l'adoptent directement alors que d'autres adoptent des lois qui autorisent les municipalités à en faire un règlement municipal.

La quantité de détails nécessaires pour assurer la sécurité incendie dans les bâtiments est énorme. C'est pourquoi le CNB fait référence à des centaines de normes, dont certaines sont des codes en elles-mêmes, par exemple le Code canadien de l'électricité, première partie[4]. Ces normes, qui assurent un degré minimal de sécurité dans des domaines techniques spécifiques, sont généralement élaborées par des organismes de normalisation canadiens, par le biais de comités dont la composition est semblable à celle du CACNB. Au Canada, les

principaux organismes de normalisation dans le domaine de l'incendie sont l'Association canadienne de normalisation (ACNOR), les Laboratoires des assureurs du Canada (Underwriters Laboratories of Canada, ULC) et l'Association canadienne du gaz (ACG). En outre, les normes de la National Fire Protection Association sont utilisées abondamment dans le domaine de la sécurité incendie.

Bien que le recours à une exigence ou la référence à une norme sous-entende un certain niveau de performance, le CNB n'exige pas que les produits ou ensembles soient homologués. Les organismes d'homologation offrent un service aux utilisateurs des codes et aux organismes de réglementation en certifiant que les produits portant leurs marques ont été soumis à des essais et sont conformes aux divers codes et normes. Bien que l'homologation ne soit pas exigée comme preuve de performance, elle permet de confirmer que des normes minimales ont été respectées.

Méthode intégrée d'analyse de la sécurité incendie

Comme nous l'avons mentionné, un concepteur aux prises avec un problème relié à la protection incendie ou à la sécurité des personnes en cas d'incendie est souvent tenté de recourir uniquement aux solutions proposées par les codes et normes. Lorsque ces solutions n'offrent pas les réponses recherchées, ou qu'elles proposent des réponses non souhaitables du point de vue d'autres aspects du projet (comme l'esthétique, le coût ou la fonction), on recommande une analyse de la sécurité incendie selon une méthode intégrée pour résoudre le problème.

Les concepteurs de bâtiments et les ingénieurs en protection incendie peuvent recourir à une telle analyse pour résoudre des problèmes particuliers. Les agents du bâtiment utilisent souvent cette analyse pour évaluer des solutions de rechange soumises à leur approbation. Les rédacteurs des codes pourront également s'en servir pour évaluer l'impact et la rentabilité des modifications proposées au Code du bâtiment.

L'expression 'méthode intégrée d'analyse de la sécurité incendie' décrit un processus systématique pour résoudre un problème relié à la sécurité incendie. La méthode décrite ci-après est basée sur l'arbre des concepts de sécurité incendie de la NFPA, dont il est question dans le Fire Protection Handbook[5] et dans la norme 550 de la NFPA intitulée 'Fire Safety Concepts Tree'[6]. Cependant, elle ne fait l'objet ici que d'un traitement élémentaire pour illustrer la relation entre les exposés du Regard 87 et l'arbre du NFPA et la mesure dans laquelle l'application de ces analyses est influencée par les codes.

Dans cet exposé, on n'utilise pas de données quantitatives concernant un problème spécifique relié aux incendies; celles-ci sont d'ailleurs difficiles à obtenir. La Section d'étude du feu de l'IRC travaille en collaboration avec le Footscray Institute of Technology (Australie), à la mise au point d'un modèle d'évaluation quantitative des risques incorporant les concepts du Code national du bâtiment et l'expérience acquise au Canada en matière d'incendies. De plus, le ministère du Logement de l'Ontario participe avec l'IRC et les autres provinces à la création d'un cadre d'évaluation des codes pouvant servir à analyser toutes les exigences des codes canadiens, pas seulement celles reliées aux incendies. Ces modèles seront mis au point dans les années à venir et devraient s'avérer des outils très utiles pour l'évaluation des risques d'incendies et des méthodes de protection incendie.

Principales divisions

Les sections qui suivent décrivent une méthode intégrée d'analyse de la sécurité incendie. D'autres méthodes existent mais celle-ci est la plus utilisée en Amérique du Nord. Les principales divisions de l'arbre des concepts de sécurité incendie[6] sont illustrées à la figure 6. Le symbole + signifie que l'une ou l'autre des divisions réalisera l'objectif de la case au-dessus. Pour utiliser cet arbre, les éléments généraux des cases sont remplacés par les paramètres du problème à l'étude. Dans la conception des bâtiments, les objectifs de sécurité incendie indiqués dans la case supérieure devraient décrire le degré de protection qu'un bâtiment doit assurer aux occupants, au contenu et aux voisins. Par exemple, l'objectif au niveau de la sécurité des personnes pourrait être de protéger les occupants contre une situation intenable et intolérable durant un certain temps, alors que l'objectif au niveau du contenu pourrait être de limiter les pertes matérielles. Les objectifs varient donc en fonction de la situation. Ceux d'un hôpital seront différents de ceux d'un entrepôt automatisé.

Le temps dont disposent les occupants pour évacuer le bâtiment sans danger est un des

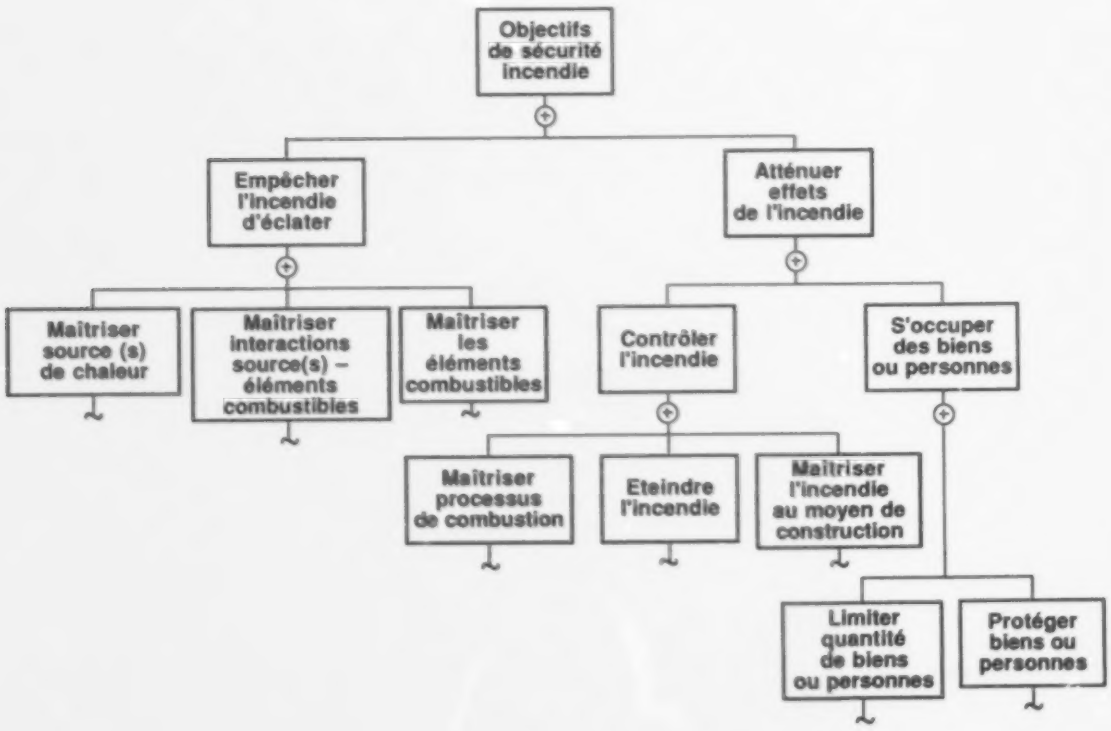
objectifs de base utilisés dans la méthode intégrée d'analyse de la sécurité incendie lorsque la sécurité des personnes est un facteur. Bien qu'il ne soit pas défini spécifiquement dans le CNB, le temps d'évacuation est implicite dans de nombreuses exigences relatives aux trajets d'évacuation et il peut être calculé à partir de celles-ci. Ce temps d'évacuation sert de base à l'évaluation des mesures de sécurité incendie du bâtiment en termes de protection des occupants et varie selon le type d'occupation; par exemple, le temps d'évacuation doit être plus long dans un centre d'hébergement que dans un magasin de détail de mêmes dimensions.

Lorsqu'il est question des objectifs en matière de protection des biens, le degré minimum de sécurité incendie est habituellement fonction de considérations d'ordre économique, sauf lorsque le bien à protéger assure un service essentiel. Les primes d'assurances et le coût des mesures de protection contre l'incendie sont des considérations économiques importantes.

Au premier niveau de l'arbre, les objectifs en matière de sécurité incendie peuvent être réalisés en empêchant l'incendie d'éclater ou, si un incendie se déclare, en atténuant ses effets. La prévention de l'incendie relève essentiellement d'un document comme le Code national de prévention des incendies[7] et exige, pour être efficace, un monitorage constant. Les principaux adeptes de cette forme de sécurité incendie sont les services des incendies et les organismes d'information offrant des programmes de prévention des incendies. Cependant, l'efficacité de ces programmes est limitée; aucun n'élimine complètement le risque d'un incendie. Pour réaliser l'objectif de sécurité incendie, le contrôle des effets de l'incendie joue un rôle important.

Afin que chaque division puisse atteindre par elle-même l'objectif, chacune doit avoir un niveau d'efficacité de 100 %. Dans la réalité, ces niveaux sont rarement atteints. C'est pourquoi la plupart des analyses de la sécurité incendie tiennent compte de diverses mesures ou de mesures superflues dans une certaine division. Cependant, l'objectif est d'obtenir une efficacité et une fiabilité à 100 % en recourant aux mesures nécessaires.

Figure 6 Principales divisions de l'arbre des concepts de sécurité incendie



On peut contrôler les effets de l'incendie soit en le maîtrisant, soit en s'occupant des biens ou personnes menacés (en supposant que chaque division est fiable à 100 %). Lorsqu'on parle de biens, on entend le contenu du bâtiment ou un bâtiment adjacent. S'occuper des biens ou personnes signifie généralement les déplacer dans un endroit sûr, ou assurer leur protection sur place. Cela implique des mesures comme la conception des trajets d'évacuation et des issues et les aires de refuge, qui sont essentielles à la réalisation de l'objectif relatif à la sécurité des personnes, mais ne constituent pas le sujet de ce séminaire.

Contrôler l'incendie

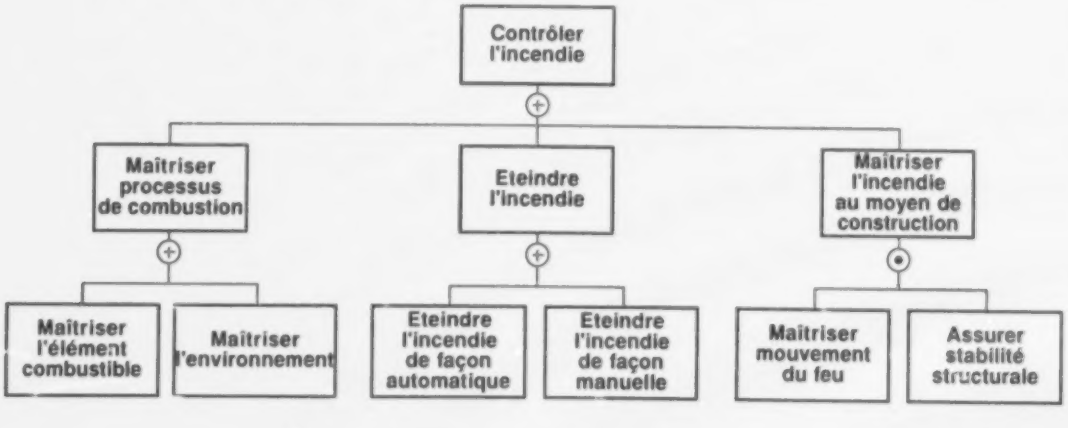
Ce séminaire sera axé sur le contrôle de l'incendie. Cette subdivision de l'arbre des concepts de sécurité incendie est illustrée à la figure 7. Cet objectif peut être réalisé en éteignant l'incendie, en maîtrisant le processus de combustion ou en contenant l'incendie au moyen de constructions.

Bien que cette mesure ne soit pas traitée dans ce séminaire, l'extinction des incendies est une technique très utile qui satisfait à l'objectif "contrôler l'incendie". Le mode d'extinction des incendies le plus courant est l'extincteur automatique, et les codes du bâtiment ont souvent recours à ce système pour assurer la sécurité des occupants du bâtiment. Comme le montre la figure 7, l'extinction de l'incendie peut se faire par des moyens automatiques (comme les extincteurs automatiques à eau ou les systèmes automatiques au halon) ou manuels (comme les extincteurs portatifs ou les tuyaux d'incendie). Les deux méthodes permettent de réaliser l'objectif, en supposant une fiabilité de 100 %, mais les deux doivent être combinées à un mécanisme de détection de l'incendie.

Le deuxième exposé de ce séminaire traite de la combustibilité des matériaux de construction, et le troisième, de leur inflammabilité et du développement de l'incendie. Ces exposés proposent des moyens de maîtriser le processus de combustion. La maîtrise de ce processus implique l'élément combustible ou l'environnement où il se trouve. L'incombustibilité des matériaux de construction, la maîtrise du processus d'inflammation, la limitation de la propagation de la flamme et du risque de développement de l'incendie sont quelques-uns des sujets faisant partie de ce domaine. La façon la plus simple de réaliser cet objectif serait d'avoir des matériaux pratiquement incombustibles, ou de créer un milieu dans lequel la combustion continue est difficile. Le mode de vie nord-américain et des considérations d'ordre économique empêchant le recours à ces solutions, les exposés traiteront plutôt de techniques et d'essais qui peuvent servir à maîtriser le processus de combustion. Cet élément est souvent combiné avec d'autres pour réaliser l'objectif "contrôler l'incendie".

Les quatrième et cinquième exposés, qui portent sur la maîtrise de l'incendie au moyen de constructions, sont consacrés à la compartimentation et à la protection des structures contre l'incendie. Pour réaliser cet objectif, la compar-

Figure 7 Subdivision "contrôler l'incendie" de l'arbre des concepts de sécurité incendie



timentation et la solidité des constructions soumises à l'action des flammes doivent toutes deux être présentes, comme l'indique le signe • dans l'arbre des concepts de sécurité incendie. La maîtrise de l'incendie au moyen de constructions est un sujet bien documenté et s'est révélé un moyen traditionnel utilisé dans les codes du bâtiment pour assurer la sécurité incendie. Ce séminaire examinera en détail la compartimentation, traitera des propriétés qui influent sur la transmission de la chaleur et des autres caractéristiques de la compartimentation, et discutera des méthodes de prédiction de la résistance au feu des éléments de construction. Encore une fois, cet élément est souvent combiné aux deux autres pour réaliser l'objectif "contrôler l'incendie".

Conclusion

Le Code national du bâtiment et le Code national de prévention des incendies contiennent des exigences générales qui se sont révélées raisonnablement efficaces pour réduire les pertes par le feu et les coûts reliés aux incendies; cependant, les données statistiques canadiennes indiquent qu'il y a place à amélioration. Le moyen le plus efficace pour résoudre un problème de sécurité incendie est de recourir aux méthodes intégrées d'analyse de la sécurité incendie, qui permettent d'aborder des problèmes et des lacunes spécifiques. De telles analyses nécessitent l'évaluation des diverses mesures de sécurité incendie et les solutions qui en résultent combinent souvent certaines de ces mesures dans la recherche d'une fiabilité approchant 100 %.

C'est dans le secteur des maisons de un et deux logements et des maisons mobiles que les améliorations apportées à la sécurité incendie auront le plus grand effet sur les pertes de vies. Ces améliorations doivent être adaptées spécifiquement aux bâtiments et au mode de vie de leurs occupants à l'aide d'une analyse de la sécurité incendie; les résultats permettront d'apporter des modifications aux codes du bâtiment. Voilà le vrai défi qui se pose aux concepteurs, aux agents du bâtiment et aux rédacteurs des codes.

Références

1. Code national du bâtiment du Canada 1985. Comité associé du Code national du bâtiment. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 23174F, 487 p.

2. Pertes causées par l'incendie au Canada. Rapport annuel 1984, 1986. Publication du Commissaire des incendies du Canada, Ottawa.

3. Lignes de conduite du CACNB 1985. Comité associé du Code national du bâtiment, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 24378F.

4. Code canadien de l'électricité, première partie, 1986. Association canadienne de normalisation. Rexdale, Ontario, CSA C22.1-1986.

5. Côté, A.E. et J.L. Linville (dir. de publ.), 1986. Fire Protection Handbook, 16e édition. Systems Concepts for Building Firesafety, National Fire Protection Association, Quincy, MA, p. 7-10 à 7-14.

6. Fire Safety Concepts Tree, 1986. National Fire Protection Association, Quincy, MA, NFPA 550 - 1986.

7. Code national de prévention des incendies du Canada 1985. Comité associé du Code national de prévention des incendies du Canada. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 23175F.

Combustibilité des matériaux de construction

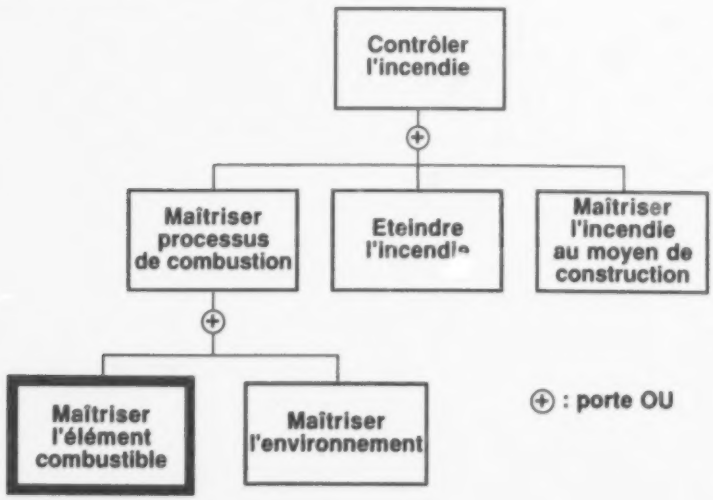
J.R. Mehaffey, Ph.D.

Introduction

Les codes du bâtiment et autres règlements imposent souvent des restrictions concernant l'inflammabilité et la combustibilité des matériaux de construction et du contenu des bâtiments, ainsi que l'utilisation de sources potentielles d'inflammation. Si les incendies sont difficiles à allumer, demeurent circonscrits une fois allumés ou, au pire, se propagent et brûlent lentement, il y a de fortes chances que les occupants du bâtiment aient suffisamment de temps pour évacuer. Cependant, il faut reconnaître qu'il n'est pas pratique d'exiger l'utilisation exclusive de matériaux de construction incombustibles ou d'imposer que le contenu soit incombustible.

Cet exposé examine les méthodes d'essai destinées à séparer les matériaux de construction en deux catégories (combustibles et incombustibles), et explique la portée des exigences concernant les constructions incombustibles contenues dans le Code national du bâtiment (CNB)[1]. La question de savoir si un bâtiment doit être de construction incombustible ou non dépend de sa dimension, de la mobilité et du niveau de conscience de ses occupants, du nombre de rues qui l'entourent, et de la présence ou l'absence d'extincteurs automatiques à eau.

Figure 1 Élément "maîtriser l'élément combustible" de la subdivision "contrôler l'incendie" de l'arbre des concepts de sécurité incendie



En ce sens, la maîtrise du contenu combustible des bâtiments (ou la maîtrise de l'élément combustible) joue un rôle important dans la subdivision "contrôler l'incendie" de l'arbre des concepts de sécurité incendie (figure 1).

Une discussion sur la nécessité de mettre au point une méthode d'essai plus générale pour évaluer le degré de combustibilité des matériaux de construction conclut cet exposé.

La nature chimique et physique du feu

Un chimiste considère un feu comme une série complexe de réactions chimiques impliquant l'oxydation du combustible, qui contient habituellement du carbone. Physiquement, un feu est évidemment caractérisé par une flamme visible, la chaleur et la fumée.

Le triangle du feu décrit à la figure 2 illustre les trois composantes nécessaires à la présence d'un incendie : l'élément combustible, l'oxygène et la chaleur. Le triangle du feu peut être considéré comme le modèle descriptif du feu du physicien. Son utilité devient évidente au niveau de l'extinction. L'extinction peut être réalisée en isolant l'une des trois composantes des deux autres. On peut éteindre un feu en éliminant la chaleur (avec un jet d'eau par exemple), en éliminant l'élément combustible (en coupant l'alimentation en gaz d'un brûleur Bunsen, par exemple), ou en coupant l'oxygène (en étouffant l'incendie à l'aide d'une couverture).

La représentation physique du feu est utile, mais on ne peut ignorer les réactions chimiques nécessaires à son développement. Les composantes de base du feu devraient également inclure les réactions en chaîne non refrénées à l'intérieur de la flamme et à la surface de l'élément combustible, décrites à la figure 3. Cela ouvre la voie à la possibilité d'une quatrième technique d'extinction : l'inhibition de la réaction en chaîne (suppression de la flamme) avec des produits chimiques ignifuges. Les halogènes comme le brome et le chlore (qu'on retrouve dans les halons) sont des exemples d'éléments chimiques qui agissent de cette façon.

Évidemment, un incendie ne se limite pas à la présence ou à l'absence de ces trois ou quatre composantes. Le feu est un phénomène complexe dans lequel s'entremêlent la cinétique des réactions chimiques, la mécanique des fluides, le transfert de chaleur et la thermodynamique. Le processus d'inflammation d'un solide, par exemple, peut être décrit comme suit.

Prenons une source de chaleur externe (un fil surchauffé) en contact avec un matériau combustible (le bois par exemple). La température à la surface du bois augmente progressivement jusqu'à 100 °C, point où l'eau est expulsée sous forme de vapeur. Au fur et à mesure que la température augmente, le bois commence à subir les effets de la pyrolyse; il commence à se décomposer en substances volatiles (vapeurs) et en couche carbonisée. Étant donné que les gaz volatils sont plus chauds et par conséquent moins denses que l'air ambiant, ils s'élèvent et se mélangent à l'air.

Figure 2 Triangle du feu – Trois composantes nécessaires à un feu

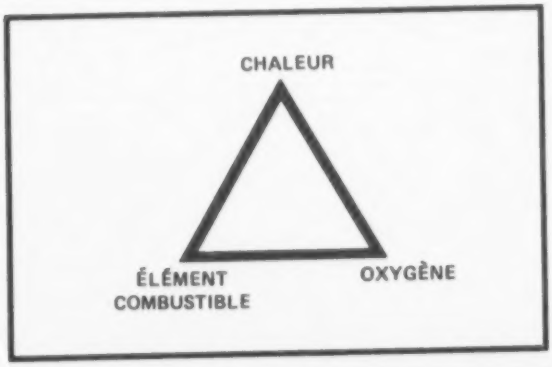
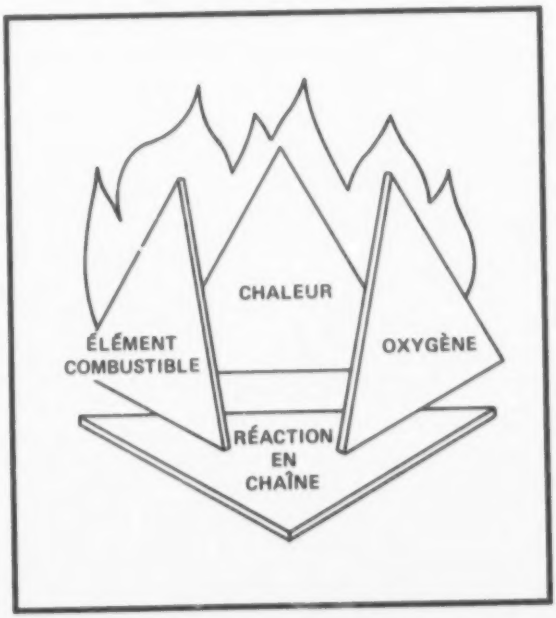


Figure 3 Tétraèdre du feu – Réactions chimiques nécessaires à l'alimentation du feu



À environ 300 °C, ce mélange de gaz volatils et d'air peut s'enflammer et produire une flamme. Une partie de la chaleur produite par la flamme s'échappe avec les gaz chauds alors qu'une autre portion est retournée à l'élément combustible (transfert de chaleur par rayonnement, par convection et par conduction), entraînant une augmentation additionnelle de sa température et accélérant le processus de pyrolyse. La flamme croît à son tour. Si la chaleur retournée à l'élément combustible est suffisante pour causer son autopyrolyse et son autocombustion, nous obtenons une "combustion à flamme vive soutenue". La source d'inflammation originale n'est plus requise (figure 4).

La formation de la couche carbonisée, qui se produit seulement dans certains matériaux, peut jouer un rôle important dans le processus de combustion. Située entre la flamme et l'objet en feu, elle peut agir comme bouclier en ralentissant le transfert de chaleur à l'élément combustible vierge et en diminuant la vitesse de combustion ou le taux de dégagement de la chaleur. Un feu ne brûle pas aisément sur la face supérieure d'un morceau de bois.

En revanche, pour les géométries comme celles décrites à la figure 5, l'air (oxygène) entraîné dans la flamme peut agir directement sur la couche carbonisée chaude. La couche carbonisée peut s'oxyder (devenant lumineuse) et la chaleur dégagée peut entraîner la pyrolyse de l'élément combustible vierge situé sous la couche carbonisée. Les morceaux de bois brûlent aisément s'ils sont allumés par en dessous.

Les produits de la combustion s'élèvent au-dessus de la flamme sous forme de fumée et de chaleur. La fumée est composée de particules solides (suie), de gouttelettes de liquides et de gaz, dont certains peuvent être toxiques. Parmi les gaz produits, l'oxyde de carbone est certainement le plus important; cependant, du cyanure d'hydrogène et de l'acide chlorhydrique peuvent également se dégager lorsque du polyuréthane ou du chlorure de polyvinyle brûle. Étant très légers, la fumée et ses gaz toxiques peuvent se propager dans des endroits passablement éloignés du foyer et présenter la première menace véritable aux occupants d'un bâtiment. C'est pourquoi elle constitue la principale cause de décès par le feu.

La combustion à flamme vive se différencie facilement d'un autre type de combustion appelé feu couvant. Essentiellement, le feu couvant se caractérise par de faibles températures et une vitesse de combustion très lente. Il se produit lorsque des gaz volatils s'échappant de la surface de l'élément combustible ne sont pas suffisamment chauds ou en quantité suffisante pour s'enflammer, mais la chaleur dégagée est suffisante pour que la pyrolyse de l'élément combustible se poursuive. L'absence de forces d'entraînement signifie qu'une faible quantité d'air est aspirée au-dessus de la surface de l'élément combustible, limitant ainsi la vitesse

Figure 4 Combustion à flamme vive soutenue

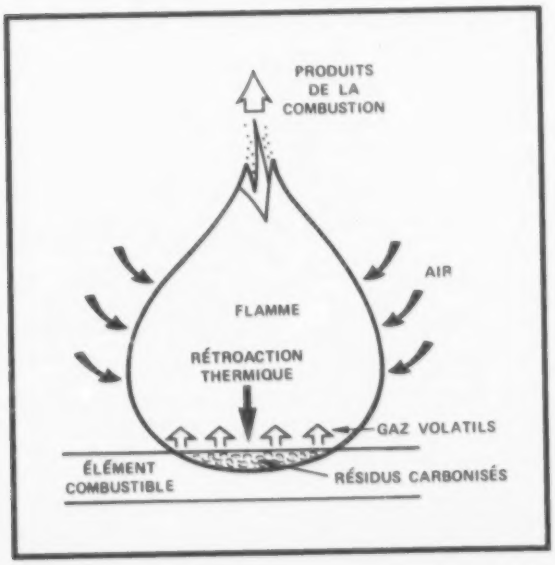
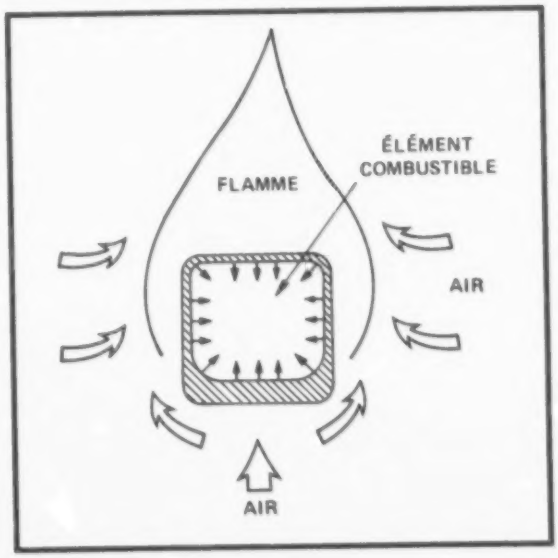


Figure 5 Combustion à flamme vive d'un solide produisant une couche carbonisée



de combustion. Des produits comme l'isolant cellulosique en vrac, le panneau de fibres et, évidemment, les cigarettes brûlent lentement sans flamme durant une période de temps considérable avec une source d'inflammation faible.

Les éléments combustibles solides ou les matériaux combustibles peuvent être caractérisés de nombreuses façons. Par exemple, il faut faire une distinction entre les matériaux qui carbonisent et ceux qui ne carbonisent pas, basée sur la capacité du matériau à engendrer un résidu carbonisé lorsqu'il se pyrolyse. La plupart des matériaux à forte teneur en cellulose comme le bois produisent des résidus carbonisés; cependant, il en va de même pour le chlorure de polyvinyle à base d'hydrocarbure et certaines résines thermodurcissables comme les mousses phénoliques et polyisocyanurates. D'autres matériaux, tel que le polystyrène, ne produisent pas ou peu de résidu carbonisé lorsqu'ils brûlent.

Une autre distinction est faite entre les polymères de synthèse selon leur propension à ramollir ou fondre (se déformer) à une température inférieure à celle requise pour que la décomposition thermique ou l'inflammation se produise. S'il possède cette caractéristique, le polymère est appelé un thermoplastique. Lorsqu'ils sont la proie des flammes, ces matériaux peuvent avoir un effet sur le comportement du feu, en raison des gouttelettes qui tombent ou de la propagation d'une nappe de polymère fondu sur le sol. Les polymères ayant une structure moléculaire interreliée ne fondent pas lorsqu'ils sont chauffés. À la place, à une température suffisamment élevée, ils se décomposent, dégageant des gaz volatils directement du solide et laissant souvent derrière, comme le bois, un résidu carbonisé. Ces polymères sont appelés des résines thermodurcissables.

Le tableau 1 contient quelques exemples de polymères thermoplastiques et thermodurcissables. Les mousses de polyuréthane rigides couramment utilisées comme isolant sur la surface extérieure des murs ou par-dessus un platelage, ainsi que le polyuréthane flexible utilisé comme rembourrage dans les meubles, sont généralement thermodurcissables, bien que l'usage répandu de plastifiants peut faire en sorte que certaines mousses de polyuréthane se comportent comme des thermoplastiques. Les phénols sont des matériaux thermodurcissables utilisés dans les disjoncteurs.

Tableau 1 Certains polymères synthétiques

Thermoplastiques (fondent)	Thermodurcissables (ne fondent pas)
Polyéthylène	Epoxy
Polyméthylène	Polyester (fibre ou verre armé)
Polyméthylméthacrylate (PMMA)	Polyisocyanurate
Polypropylène	Polyuréthane (rigide ou flexible)
Polystyrène	Phénol
Chlorure de polyvinyle (PVC)	

Les thermoplastiques servent à divers usages. Le chlorure de polyvinyle (PVC) est principalement utilisé pour les tuyaux et les conduites, le polystyrène comme isolant, le polyéthylène comme pare-vapeur et le Plexiglass* comme vitrage.

Sources d'inflammation dans les incendies de bâtiments

De toute évidence, une mesure de protection contre l'incendie efficace serait de diminuer le nombre d'incendies en limitant le nombre d'inflammations. Les incendies dans les bâtiments débutent habituellement par l'inflammation d'un seul article, ce qui met en cause deux facteurs : la source d'inflammation et le premier objet qui s'enflamme.

Des données statistiques concernant les sources d'inflammation lors d'incendies dans des bâtiments et des véhicules sont compilées annuellement par le Commissaire des incendies du Canada. Les pertes par le feu par source d'inflammation pour 1984 sont résumées au tableau 2[2]. Les sources d'inflammation les plus courantes incluent les appareils de cuisson, les appareils de chauffage, les installations électriques et les articles de fumeur ou la flamme nue. Les dangers associés à ces sources d'inflammation sont connus depuis un certain temps. Il ne serait sûrement pas pratique d'essayer d'éliminer ces sources. À la place, des codes et normes ont été élaborés pour réduire ces risques. Certaines de ces mesures sont résumées au tableau 3.

*Marque de commerce

Tableau 2 Pertes par le feu par source d'inflammation, 1984

Source d'inflammation	Nombre d'incendies	Pertes en $	Blessures	Morts
Aucune source de feu (ex. la foudre)	450	11 829 531	20	2
Appareils de cuisson	8 406	43 355 794	692	48
Appareils de chauffage	7 915	87 320 198	285	61
Appareils et matériel	2 605	21 432 925	78	6
Installations électriques	7 640	108 671 994	281	33
Autre matériel électr.	1 671	16 997 569	67	7
Articles de fumeurs	5 399	42 090 030	724	181
Allumettes, briquets, chandelles, cierges	2 218	24 939 216	135	17
Chalumeau, mat. de soudure, torches	933	21 620 019	93	2
Cendres chaudes, tisons	536	7 153 197	12	1
Articles de fumeurs ou flamme nue	5 248	43 499 032	149	13
Exposition aux feux d'autres bâtiments	2 150	19 273 978	24	8
Divers	15 203	171 286 013	453	31
Indéterminé	10 356	310 009 575	1 090	188
TOTAL	70 730	929 479 253	4 103	598

Tableau 3 Codes et normes régissant les sources d'inflammation

Source d'inflammation	Codes et normes
Appareils de cuisson	CNB - exigences d'installation ACNOR - spécifications (produits) ACG - spécifications (produits)
Appareils de chauffage	CNB - exigences d'installation ACNOR - spécifications (produits) ACG - spécifications (produits)
Appareils et matériel	ACNOR - spécifications (produits)
Installations électriques	CCE - exigences d'installation ACNOR - spécifications (produits)
Flammes nues	CPI - pratiques permises
Soudure et matériel de découpage	CPI - pratiques permises

CNB - Code national du bâtiment
ACNOR - Association canadienne de normalisation
ACG - Association canadienne du gaz
CCE - Code canadien de l'électricité
CPI - Code de prévention des incendies

Le premier objet qui s'enflamme

L'inflammation nécessite une source d'inflammation et un élément combustible. Comme dans le cas des sources d'inflammation, il ne serait pas pratique de simplement éliminer les éléments combustibles dans les bâtiments. On essaie plutôt de limiter leur sensibilité à l'inflammation ou leur combustibilité.

Dans une étude récente effectuée par Consommation et Corporations Canada[3], les données statistiques provinciales ont été examinées pour établir quels matériaux sont plus susceptibles d'être le premier objet qui s'enflamme lors d'un incendie dans un bâtiment ou un véhicule. Les résultats de l'étude sont résumés au tableau 4.

Les matériaux qui de loin s'enflamment le plus couramment en premier sont les liquides inflammables ou combustibles, comme la gazoline, l'huile à cuisson ou le gras. Le danger que constituent ces substances est bien connu. Des exigences relatives à la manipulation et à l'entreposage de ces liquides sont contenues dans la partie 4 de l'édition 1985 du Code national de prévention des incendies[4], et elles débordent le cadre de ce séminaire.

La seconde catégorie des premiers matériaux à s'enflammer sont les objets mobiliers comme les meubles rembourrés, la literie et les matelas. Alors que 10,4 % des incendies sont causés par l'inflammation d'un objet mobilier, ces mêmes incendies sont responsables de 24,5 % des décès et de 19,8 % des blessures. Ce sont des incendies très dangereux au niveau de la sécurité des occupants. Compte tenu de ce risque, certaines catégories d'objets mobiliers sont régies par la Loi sur les produits dangereux. Pour être vendus au Canada, les matelas doivent offrir une résistance à l'inflammation par une cigarette[5], les tentures (et autres tissus) à l'inflammation par une petite flamme[6], et les moquettes à l'inflammation par une tablette de méthénamine (une source d'inflammation un peu plus ardente qu'une cigarette)[7]. Récemment, des dispositions ont été prévues par la loi afin d'inciter les fabricants de meubles à soumettre leurs produits à des essais de résistance à l'inflammation par des cigarettes.

La troisième catégorie des premiers matériaux à s'enflammer sont les éléments de construction comme les éléments structuraux et les matériaux de finition. Ils sont la cause de 10,3 % des incendies, de 13,6 % des pertes de capitaux, de 7,4 % des blessures et de 10,0 % des décès. Ils représentent une importante cause d'inquiétude et constituent le principal sujet de ce qui suit.

Tableau 4 Premiers matériaux à s'enflammer lors d'incendies de bâtiments ou de véhicules

	Pourcentage du total			
Premier matériau enflammé	Dollars	Pertes	Blessures	Décès
Liquides inflammables ou combustibles	18,7	11,1	23,6	7,3
Ameublement	10,4	7,2	19,8	24,5
Éléments structuraux et matériaux de finition	10,3	13,6	7,4	10,0
Isolant électrique	9,8	3,2	4,0	1,2
Bois, produits de papier	8,2	11,5	8,6	4,7
Vidanges et déchets	4,1	0,7	2,3	0,5
Vêtements, textiles	3,4	1,4	3,4	6,8
Produits chimiques, plastiques, métaux	2,4	1,4	1,8	0,2
Produits agricoles et forestiers	2,1	4,7	1,3	1,3
Gaz inflammables	1,9	1,5	4,3	0,6
Autres	0,4	0,3	0,1	0,1
Non classés	22,3	39,3	22,9	36,1
Inconnus	6,2	4,0	0,5	6,7
TOTAL	100,2	99,9	100,0	100,0

La nécessité de matériaux de construction incombustibles

Règle générale, les matériaux de construction sont regroupés en deux catégories dans le Code national du bâtiment : combustibles et incombustibles. Il est important de distinguer entre la sensibilité à l'inflammation et la combustibilité d'un matériau. Sa sensibilité est sa capacité d'être allumé ou de brûler. Le Code national du bâtiment ne traite pas directement de sensibilité à l'inflammation. On n'a pas établi avec certitude les sources d'inflammation auxquelles les matériaux de construction doivent résister. Cependant, la combustibilité des produits du bâtiment est traitée dans le CNB.

Confrontés à de sérieux problèmes d'incendies, les comités responsables de l'élaboration des codes ont décidé il y a quelques années que certains bâtiments, particulièrement les immeubles en hauteur, ou ceux avec des aires considérables, devaient être construits avec des matériaux incombustibles pour obtenir une soi-disant "construction à l'épreuve du feu". Ce type de construction aiderait à assurer l'évacuation en toute sécurité des occupants, et faciliterait la tâche des sapeurs-pompiers en empêchant la propagation des flammes par des espaces dissimulés. De plus, une construction à l'épreuve du feu combinée à des exigences de résistance au feu adéquates a pour but d'assurer que le bâtiment ne subira pas de dommages excessifs ou ne s'effondrera pas avant que l'évacuation et l'extinction soient complétées. Finalement, la propagation du feu à d'autres bâtiments devrait diminuer. Au Canada, durant les années 1800 et 1900, de tels incendies se transformaient souvent en conflagrations ravageant des quartiers urbains complets.

L'essai d'incombustibilité

Un matériau de construction est considéré comme incombustible s'il respecte les critères de réception contenus dans la norme CAN4-S114-M80, Méthode d'essai normalisée pour la détermination de l'incombustibilité des matériaux de construction[8]. La méthode d'essai n'a pour but que d'évaluer la performance des matériaux de construction de base; elle ne s'applique pas aux matériaux recouverts d'un revêtement de protection ou de décoration, ni à ceux qui sont imprégnés ou constitués de plusieurs couches de matériaux différents.

L'essai est réalisé dans un petit four chauffé à l'électricité, représenté à la figure 6. Les températures dans le four sont déterminées par un thermocouple de contrôle servant à stabiliser la température du four avant l'essai, et par un thermocouple indicateur, utilisé pour mesurer toute augmentation de la température lors de l'essai. Un miroir est utilisé pour faire des observations par l'évent durant l'essai.

Les échantillons d'essai ont une base de 38 sur 38 mm et une hauteur de 50 mm. Si l'échantillon risque de se désintégrer ou de fondre durant l'essai, il doit être soutenu par une toile métallique ou un plat de tôle mince. Au moins trois échantillons du matériau doivent être soumis à l'essai. Avant de procéder aux essais, ces échantillons doivent être séchés à 60 ± 3 °C durant une période de 24 à 48 heures et refroidis à la température de la pièce dans un milieu sec.

Juste avant un essai, le four est chauffé jusqu'à ce que le thermocouple de contrôle indique 750 ± 3 °C, puis stabilisé à 1 °C près durant 15 minutes. L'échantillon est placé dans le porte-échantillon et inséré dans le four par le dessous. La durée de l'essai est de quinze minutes, sauf si l'on constate dès les premières minutes que l'essai a échoué.

Les matériaux soumis à l'essai sont considérés comme incombustibles si :

- La moyenne des augmentations maximales de température (mesurée par le thermocouple indicateur) pour les trois échantillons (ou plus) soumis à l'essai n'excède pas 36 °C.
- Aucun des échantillons n'est la proie des flammes durant les dernières 14 minutes et 30 secondes de l'essai.
- La perte maximale de masse de n'importe lequel des échantillons ne dépasse pas 20 % durant l'essai.

Il importe de noter que le résultat de l'essai est soit une réussite ou un échec, c'est-à-dire que le matériau se révèle combustible ou incombustible. L'essai ne permet pas de mesurer le degré de combustibilité du matériau.

Laboratoires d'essai

Les laboratoires canadiens suivants sont en mesure d'effectuer l'essai d'incombustibilité :

- Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Ontario
- Ontario Research Foundation, Mississauga, Ontario
- Laboratoires des assureurs du Canada, Scarborough, Ontario
- Les Services professionnels Warnock Hersey Ltée, Coquitlam, Colombie-Britannique.

Le CNRC n'a pas l'habitude d'effectuer des essais pour le compte des fabricants de produits puisqu'il est généralement admis que cette responsabilité et ce marché appartiennent aux laboratoires d'essais commerciaux.

Essai des produits

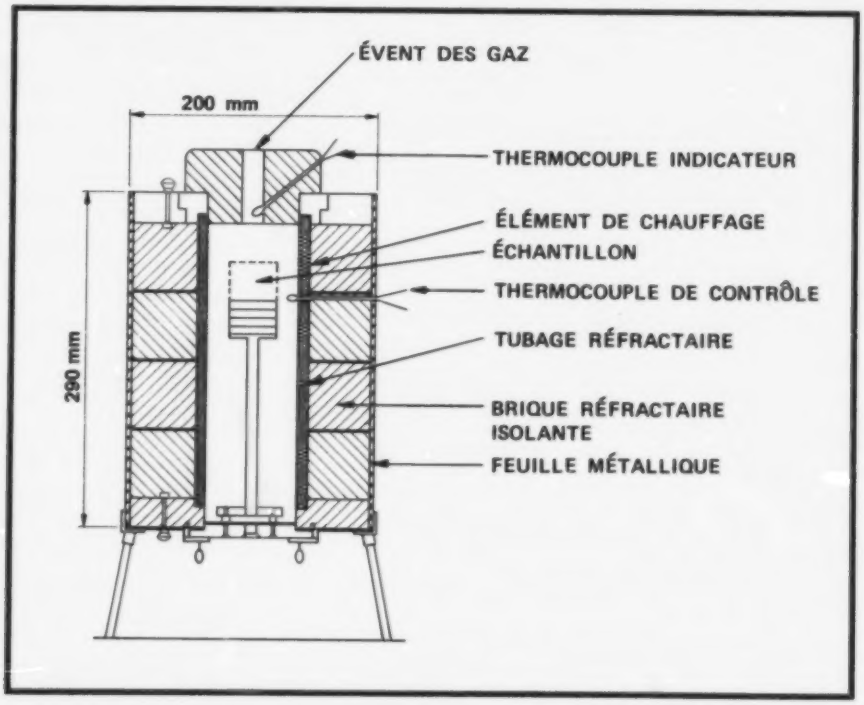
Les données produites par le CNRC sur la combustibilité du sapin de Douglas, de l'isolant de fibre de verre et de l'aluminium sont résumées à la figure 7. (Lors de l'essai de tous les produits, une baisse de température a été constatée (enregistrée au thermocouple enregistreur) au début de l'essai, lorsque l'échantillon froid est inséré dans le four chaud.)

L'échantillon de sapin de Douglas est classé combustible, puisqu'il ne satisfait à aucun des trois critères de réception. Une augmentation maximale de la température de 255 °C a été enregistrée; on a observé des flammes après le délai de 30 secondes (en fait, à certains moments, les flammes s'échappaient par l'évent), et la perte de masse s'élevait à environ 88 %. Il n'est donc pas étonnant de constater qu'un produit du bois soit classé combustible.

L'isolant de fibre de verre est également considéré comme combustible. Bien qu'il n'y avait pas de flammes lors des 14 dernières minutes et demie de l'essai et que la perte de masse ne s'établissait qu'à environ 7 %, l'augmentation de température de 70 °C excédait par une faible marge la valeur permise. L'essai a échoué en raison des résines (liants) utilisées dans le produit. Il existe peut-être des formules d'isolant de fibre de verre qui pourraient réussir l'essai.

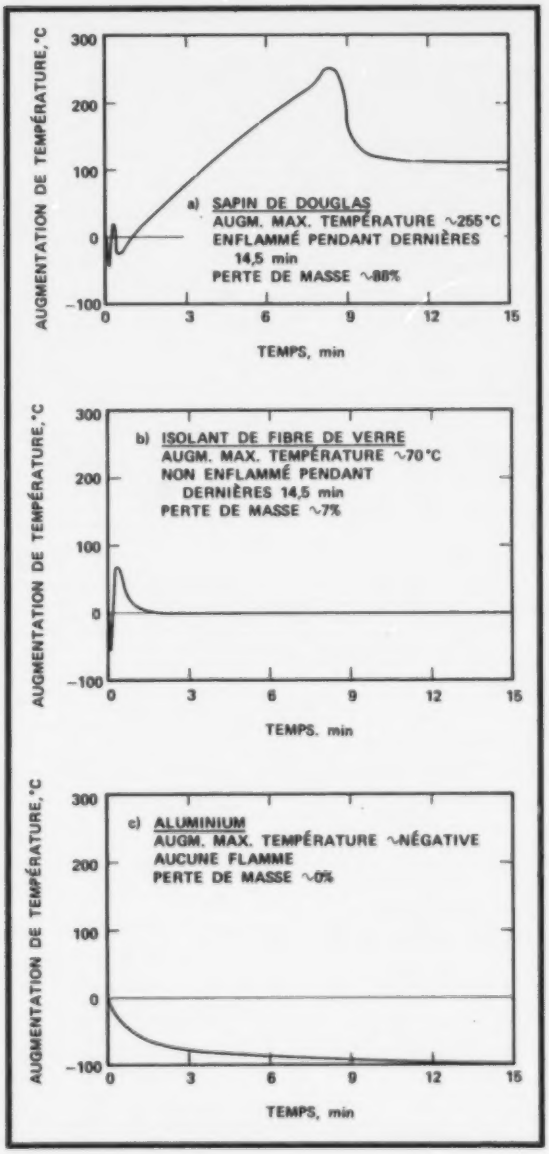
On ne sera pas étonné d'apprendre que l'échantillon d'aluminium s'est révélé incombustible. Il a fondu quelque peu durant l'essai et a

Figure 6 Four pour essais d'incombustibilité



ainsi absorbé de la chaleur du four, ce qui explique que des températures relativement faibles aient été enregistrées. Il n'y a eu aucune flamme et aucune perte de masse durant l'essai, puisque l'aluminium en fusion a été contenu à l'intérieur d'un petit plat. Les résultats de l'essai permettent de croire que les éléments de construction en aluminium ne seront pas soumis à une oxydation rapide en cas d'incendie dans un bâtiment. Ce qui ne veut pas dire que l'aluminium ne peut jamais être soumis à une oxydation rapide; cela peut se produire si certaines conditions généralement très différentes de celles qu'on retrouve lors des incendies à l'intérieur des bâtiments sont présentes[9].

Figure 7 Résultats d'essais menés conformément à l'essai d'incombustibilité CAN4-S114-M80. Les échantillons de sapin de Douglas et de fibre de verre se sont révélés combustibles et celui de l'aluminium, incombustible



De nombreuses années d'essais nous ont permis d'apprendre de nombreuses choses au sujet de la performance des matériaux de construction courants. Une partie de ces renseignements est résumée dans le Chapitre 2 du Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1985[10].

La plupart des matériaux de composition animale ou végétale sont classés combustibles d'après la norme CAN4-S114-M80. Le bois, les panneaux de fibres de bois, le papier, le feutre à base de fibres animales ou végétales, le liège, le plastique, le bitume et le brai seraient considérés comme combustibles. Les matériaux combinant des éléments combustibles et incombustibles, comme la plaque de plâtre, sont classés combustibles dans bien des cas, sauf si les éléments combustibles sont en petites quantités. Certains isolants de laine minérale avec liant combustible, béton de cendres, ciment et particules de bois, ainsi que la placoplâtre à base de fibres de bois seraient également classés combustibles. Ordinairement, l'addition de produits chimiques ignifuges ne suffit pas pour transformer un produit combustible en produit incombustible.

Les matériaux incombustibles incluent la brique, le carreau céramique, le béton de ciment Portland avec granulats incombustibles, les métaux utilisés couramment dans les bâtiments, le verre, le granit, le grès, l'ardoise, la pierre calcaire et le marbre.

Exigences des codes du bâtiment

En plus de faire une dictinction entre les matériaux combustibles et incombustibles, la version actuelle du CNB établit une dictinction entre les constructions combustibles et incombustibles. Puisque la construction combustible est définie comme une construction qui n'est pas conforme aux exigences d'une construction incombustible, il est important d'examiner d'abord ce qu'on entend par une construction incombustible.

Dans une construction incombustible, les ensembles doivent être construits avec des matériaux incombustibles, bien que pour des raisons pratiques, certains éléments com-

bustibles soient permis. Cependant, seuls les éléments combustibles spécifiés à l'article 3.1.4.5 du CNB peuvent être utilisés. Par exemple, la plaque de plâtre, qui est considérée comme combustible, est permise dans une construction incombustible. Lorsque des matériaux combustibles sont permis, des restrictions additionnelles sont souvent imposées concernant leur utilisation. Par exemple, un isolant combustible est permis, pourvu qu'il respecte certaines exigences reliées à la propagation de la flamme et (dans certains cas) qu'il soit protégé par une barrière thermique comme une plaque de plâtre. En ce qui concerne les revêtements intérieurs de finition combustibles, des restrictions sont également imposées concernant l'épaisseur du matériau.

Si un ensemble est construit essentiellement avec un matériau incombustible contenant des éléments combustibles qui ne sont pas permis par le Code pour une construction incombustible, l'ensemble fait partie de la catégorie des constructions combustibles. Une construction combustible comprend habituellement une ossature de bois traditionnelle ou une construction de gros bois d'oeuvre.

Le CNB exige qu'un bâtiment soit de construction incombustible si l'on s'attend à ce que les occupants aient beaucoup de difficulté à évacuer lors d'un incendie. Les bâtiments qui excèdent une certaine hauteur ou aire de surface doivent être de construction incombustible. Les limites de hauteur et d'aire du bâtiment en vertu desquelles un bâtiment peut être de construction combustible dépendent du type d'établissement, du nombre de rues auxquelles le bâtiment fait face, et de l'existence d'un réseau d'extincteurs automatiques à eau dans le bâtiment.

À titre d'exemple, les exigences concernant les habitations sont résumées à la figure 8. Les habitations dont la hauteur n'excède pas trois étages ou dont l'aire du bâtiment (superficie d'un seul étage) n'excède pas 600 m² (comme les logements uni ou bifamiliaux et les immeubles d'appartement de petites dimensions), peuvent être de construction combustible et construits en conformité avec la partie 9 du CNB. On présume que les occupants ont suffisamment de temps pour évacuer et que les moyens d'extinction suffisent à circonscrire les incendies dans les bâtiments de petites dimensions. Toutes les autres habitations doivent être construites en conformité avec les exigences plus sévères de la partie 3 du CNB.

Les habitations dont la hauteur excède trois étages doivent être de construction incombustible. Ceux dont la hauteur n'excède pas trois étages mais dont l'aire de bâtiment est supérieure à 600 m² peuvent être de construction incombustible, selon la présence d'extincteurs automatiques à eau dans le bâtiment, le nombre d'étages, l'aire du bâtiment et le nombre de rues auxquelles il fait face. Les exigences exactes sont énumérées à la figure 8. L'évacuation et les opérations de lutte contre l'incendie sont censées se dérouler plus facilement dans les bâtiments dotés d'extincteurs automatiques à eau, dans les bâtiments de faible hauteur, ayant une aire plus petite et offrant un accès direct aux sapeurs-pompiers sur plusieurs côtés (rues).

Pour certains bâtiments, une construction combustible ou incombustible est permise. Si le concepteur choisit une construction uniquement incombustible, il lui faudra toutefois appliquer les mesures moins sévères de protection contre l'incendie (p. ex. indice de propagation de la flamme) en vigueur dans les constructions combustibles.

La logique qui entoure la conception des habitations fait contraste avec la logique utilisée dans l'élaboration des exigences pour les prisons. Comme la mobilité des prisonniers est généralement restreinte, l'évacuation en cas d'incendie est très problématique. De plus, les opérations de lutte contre l'incendie sont souvent entravées par la difficulté que pose l'accès au foyer. Pour ces raisons, tous les pénitenciers doivent présentement être de construction incombustible, sans égard à des facteurs comme la hauteur du bâtiment, l'aire du bâtiment et la présence d'extincteurs automatiques à eau.

L'essai d'incombustibilité – ses lacunes

La norme CAN4-S114 est un essai très sévère, qui a pour objectif de déterminer si un matériau est incombustible ou non. Le matériau réussit ou échoue : des résultats d'essai numériques ne sont pas fournis. Règle générale, il n'est pas pratique de construire un bâtiment seulement avec des matériaux incombustibles. Par conséquent, de nombreux matériaux combustibles sont permis dans une construction incombustible.

Depuis plus de dix ans maintenant, les rédacteurs des codes veulent faire une distinc-

tion entre divers degrés ou niveaux de combustibilité : d'incombustible à très combustible. Exiger l'utilisation de matériaux incombustibles étaient une pratique commode mais trop sévère. Une solution plus convenable serait de permettre un certain degré de combustibilité en deça de limites sécuritaires. Bien que les comités responsables pour la rédaction du Code désirent adopter une telle stratégie, ils n'ont pu le faire par faute d'une procédure d'essai appropriée. Des tentatives pour modifier la norme CAN4-S114 ont été faites à cet égard, mais sans succès. Le four décrit plus haut permet de déterminer rapidement si un matériau est incombustible ou combustible; il peut difficilement servir à évaluer le degré de combustibilité des matériaux combustibles.

Un nouvel essai d'incombustibilité

Sous les auspices des Laboratoires des assureurs du Canada, des efforts sont déployés en vue de mettre au point une méthode d'essai pour déterminer le degré d'incombustibilité des matériaux. Cette méthode serait élaborée sur le modèle d'un essai américain mis au point pour d'autres fins[11].

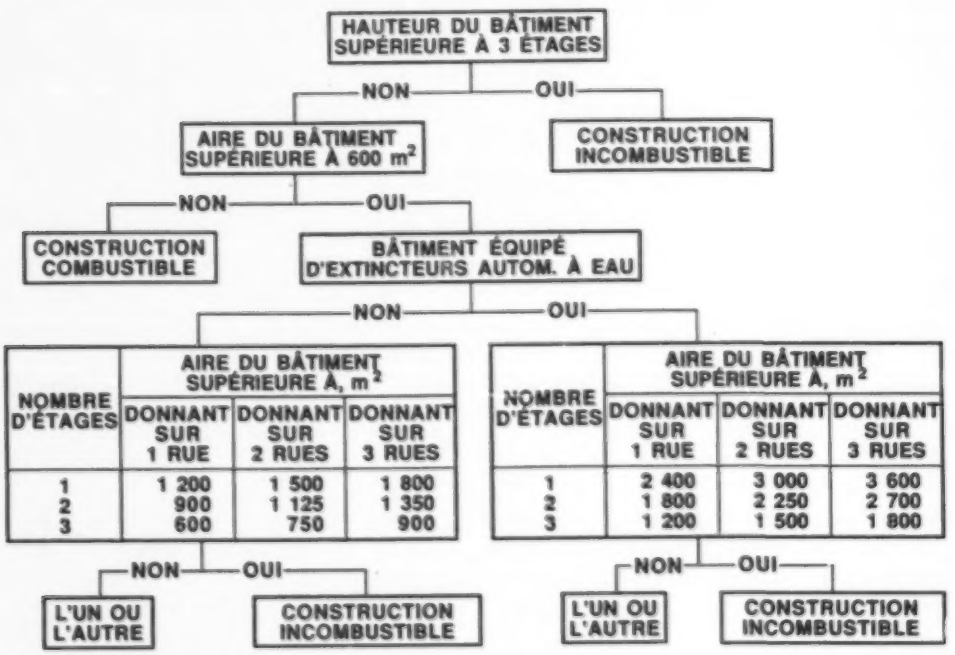
L'échantillon d'essai sera placé dans une petite chambre ventilée et soumis à deux différents niveaux d'exposition thermique par rayonnement. Une inflammation des gaz volatils sera tentée à l'aide d'une petite flamme. La mesure critique sera le taux de dégagement de la chaleur du matériau pour les deux niveaux d'expositions.

À l'aide de ces données, il sera possible d'établir deux catégories de matériaux combustibles. Ces deux catégories, qui indiqueront la contribution d'un matériau au développement et à la gravité d'un incendie, seront mentionnées dans le CNB.

Équivalences et considérations relatives à la conception

Les exigences du CNB relatives à la protection contre l'incendie sont conçues pour assurer un degré minimum de sécurité aux occupants des bâtiments. Certains sont d'avis que ces exigences assurent, en majeure partie, suffisamment de temps pour que les occupants puissent atteindre sans danger une zone sûre à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment.

Figure 8 Exigences du CNB concernant la construction incombustible dans les habitations



De temps à autre, en examinant la conception de certains bâtiments, il s'est avéré que ces exigences n'étaient pas compatibles avec l'esprit de la conception. Dans ces cas, les exigences sont considérées d'une certaine façon comme trop "restrictives". Cette situation peut se produire dans la conception d'un nouveau bâtiment ou dans la rénovation d'un bâtiment existant.

Il est impossible de prévoir tous les aspects de la conception en élaborant le CNB. Pour favoriser le recours à de nouvelles technologies ou options qui ne sont pas spécifiquement couvertes dans le CNB, la section 2.5 autorise l'utilisation de solutions permettant d'obtenir des degrés de sécurité équivalant à ceux exigés par le CNB. La plupart des codes provinciaux ont adopté une politique semblable. Il est habituellement nécessaire de fournir de la documentation prouvant que l'équivalent proposé remplit les conditions de rendement exigées par le présent Code.

L'un des objectifs de ce séminaire est de démontrer comment des solutions équivalentes peuvent être élaborées. Dans chaque exposé, des exemples seront présentés. Ces exemples ont été choisis seulement dans le but de démontrer les procédés et la logique qui interviennent. Il peut très bien y avoir des contextes dans lesquels ces exemples produiraient des solutions qui ne seraient pas satisfaisantes.

Un exemple d'élaboration d'un équivalent est celui d'une importante scierie qui désirerait construire un nouveau siège social. La compagnie insiste afin que le bâtiment soit de construction combustible, puisqu'il doit servir d'exemple de construction à ossature de bois avec plusieurs grandes pièces recouvertes de panneaux de bois de la meilleure qualité.

Un architecte, spécialiste de la construction à ossature de bois, a été retenu pour concevoir le bâtiment. Lors de sa première réunion avec la compagnie, il apprend que le bâtiment aura trois étages de haut et que chaque étage aura une superficie de 5 500 m². Il souligne immédiatement que, selon l'article 3.2.2.30 du CNB, le bâtiment doit être de construction incombustible. La plus grande superficie de plancher permise dans un immeuble à bureaux de trois étages de construction combustible est de 4 800 m², à condition que le bâtiment soit doté d'un réseau d'extincteurs automatiques à eau et fasse face à au moins trois rues.

Puisque la compagnie insiste pour que le bâtiment ait une ossature de bois, l'architecte doit élaborer une solution équivalente. À cet égard, il se peut que les exigences du code du bâtiment concernant les bâtiments de cette dimension doivent être dépassées afin d'assurer aux occupants suffisamment de temps pour évacuer en toute sécurité. L'architecte peut proposer toute combinaison des mesures suivantes :

- accroître le nombre d'issues requis et raccourcir les trajets d'évacuation;
- accroître le nombre de détecteurs d'incendie et d'alarmes requis;
- utiliser des extincteurs automatiques à intervention rapide au lieu des extincteurs traditionnels;
- augmenter l'utilisation ou le niveau de performance des compartimentations à l'intérieur du bâtiment;
- former un corps de pompiers interne.

Pour s'assurer que les bâtiments voisins ne seront pas menacés en cas d'incendie de l'immeuble à bureaux, il faudrait également accroître les distances minimales séparant le bâtiment des limites de la propriété.

Comme la surface de plancher de 5 500 m² excède de peu la valeur permise de 4 800 m², il est possible qu'en dépassant les exigences minimales contenues dans le CNB, l'architecte arrive à persuader les autorités compétentes de permettre que le bâtiment soit une construction à ossature de bois. L'architecte devrait être prêt à prouver que la solution équivalente fournit un niveau de sécurité égal ou plus élevé que celui fourni par les exigences du CNB. Une expérience d'incendies antérieurs, des essais au feu et des logiciels pourront peut-être fournir l'information nécessaire pour démontrer cet équivalent.

Résumé

La limitation de la combustibilité des matériaux de construction joue un rôle important au niveau de la sécurité incendie. Cependant, le fait de spécifier des matériaux incombustibles ne représente pas toujours une solution pratique. Dans cet exposé, un examen des méthodes d'essai destinées à séparer les matériaux combustibles des matériaux incombustibles a été proposé, et une explication de la portée des

exigences relatives aux constructions incombustibles contenues dans le CNB a été présentée. La nécessité de mettre au point des méthodes d'essai plus utiles pour évaluer le degré de combustibilité des matériaux de construction a également été discutée. Finalement, il a été montré que des solutions qui assurent des degrés de sécurité équivalant aux exigences proposées par le Code peuvent dans bien des cas recevoir l'acceptation des autorités compétentes.

Références

1. Code national du bâtiment du Canada 1985, Conseil national de recherches du Canada, Comité associé du Code national du bâtiment, CNRC 23174F, 487 p.

2. Pertes causées par l'incendie au Canada, Rapport annuel 1984. Bureau du Commissaire des incendies du Canada, Ottawa, Ontario, 1986, 23 p.

3. Phillips, D., et Kasem, M.A., 1985. Upholstered Furniture Fires in Canada, Consommation et Corporations Canada, L10127-F32 84/85, 29 p.

4. Code national de prévention des incendies du Canada 1985, Conseil national de recherches du Canada, Comité associé du Code national de prévention des incendies, CNRC 23175F, 176 p.

5. Method of Test for Combustion Resistance of Mattresses – Cigarette Test, CAN2-4.2-M77, méthode 27.7, Office des normes du gouvernement canadien, Ottawa, Ontario, 1977, 6 p.

6. Standard Test Method for Flammability of Clothing Textiles, ASTM D1230-61, Annual Book of ASTM Standards, Part 18, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, 1980, 5 p.

7. Method of Test for Flammability – Methenamine Tablet Test for Textile Floor Coverings, CAN2-4.2-M77, méthode 27.6, Office des normes du gouvernement canadien, Ottawa, Ontario, 1977, 2 p.

8. Méthode d'essai normalisée pour la détermination de l'incombustibilité des matériaux de construction, CAN4-S114-M80, Laboratoires des assureurs du Canada, Scarborough, Ontario, 1980, 15 p.

9. Chapitre 10, section 5, "Metals", Fire Protection Handbook, 16e édition, National Fire Protection Association, Quincy, MA (1986).

10. Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1985, Conseil national de recherches du Canada, Comité associé du Code national du bâtiment, CNRC 23178F, 290 p.

11. Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products, ASTM E906, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.07, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, 1986, pp. 915-936.

Inflammabilité des matériaux de construction et développement du feu

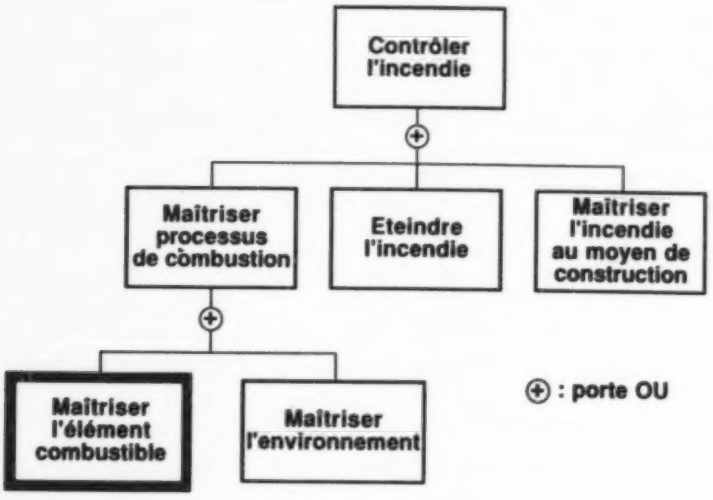
J.R. Mehaffey, Ph.D.

Introduction

En dépit des efforts en vue de limiter l'utilisation de matériaux combustibles dans les bâtiments et de prévenir l'inflammation, les incendies continuent de se produire. Le développement et la vitesse de propagation des incendies dépendent dans une large mesure de l'inflammabilité des matériaux de construction, ainsi que du contenu et de la conception du bâtiment. Plus l'incendie se propage rapidement, moins les occupants ont le temps d'évacuer.

Afin d'assurer aux occupants d'un bâtiment suffisamment de temps pour évacuer, les codes et règlements du bâtiment limitent l'inflammabilité des matériaux de construction et du contenu du bâtiment. En maîtrisant ainsi les éléments combustibles, on peut restreindre la vitesse de développement de l'incendie de manière importante. Règle générale, le degré de limitation de l'inflammabilité imposé par les codes dépend de la dimension du bâtiment, des risques qu'il présente, de la mobilité et du niveau de conscience de ses occupants, et de la présence ou de l'absence d'extincteurs automatiques à eau. La maîtrise de l'élément combustible, dans sa relation avec les autres objectifs de

Figure 1 "Maîtriser les éléments combustibles", dans la subdivision "contrôler l'incendie" de l'arbre des concepts de sécurité incendie



l'arbre des concepts de sécurité incendie, est illustrée à la figure 1.

Dans cet exposé, le rapport entre l'inflammabilité des produits et le développement de l'incendie est examiné, la nature et le statut des règlements basés sur les méthodes d'essai existantes sont décrits, et l'influence des modèles informatiques de propagation de l'incendie sur le choix des matériaux et la conception des bâtiments sont étudiés.

Développement d'un feu de local

Lorsqu'un objet s'enflamme dans un local (comme le fauteuil illustré à la figure 2), il brûle d'abord de la même façon qu'à l'air libre. Cependant, après un court laps de temps, la localisation du feu commence à influencer le développement de l'incendie. La fumée dégagée par l'objet en feu s'élève au plafond sous forme de gaz chauds; cette couche chauffe le plafond et la partie supérieure des murs de la pièce. La chaleur venant de toutes ces parties chauffées est ensuite transmise aux autres objets de la pièce par rayonnement thermique et peut augmenter la vitesse de combustion de l'objet en feu et la vitesse de propagation de la flamme sur sa surface.

À ce stade-ci, le feu peut s'éteindre si, par exemple, l'objet a totalement brûlé avant que d'autres ne s'enflamment, ou si l'apport d'oxygène n'est pas suffisant pour assurer la combustion de l'objet. Parfois, l'échauffement d'autres produits combustibles se poursuit jusqu'à ce qu'ils atteignent leur température d'inflammation plus ou moins simultanément. Dans ce cas, les flammes se propagent soudainement à l'ensemble des matériaux combustibles à l'intérieur du local. Cette extension brutale d'un incendie s'appelle 'l'embrasement général'.

Habituellement, lors de l'embrasement général, les fenêtres de la pièce éclatent, provoquant un apport d'air frais. Le foyer demeure en pleine combustion jusqu'à ce que les produits combustibles soient entièrement consumés. Les flammes s'éteignent, laissant une masse de tisons incandescents.

Le cours d'un incendie dans un local peut être exprimé en tenant compte de la température

Figure 3 Température de la couche supérieure pendant un feu de local

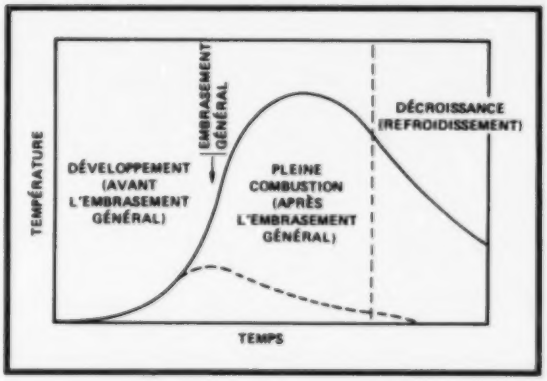
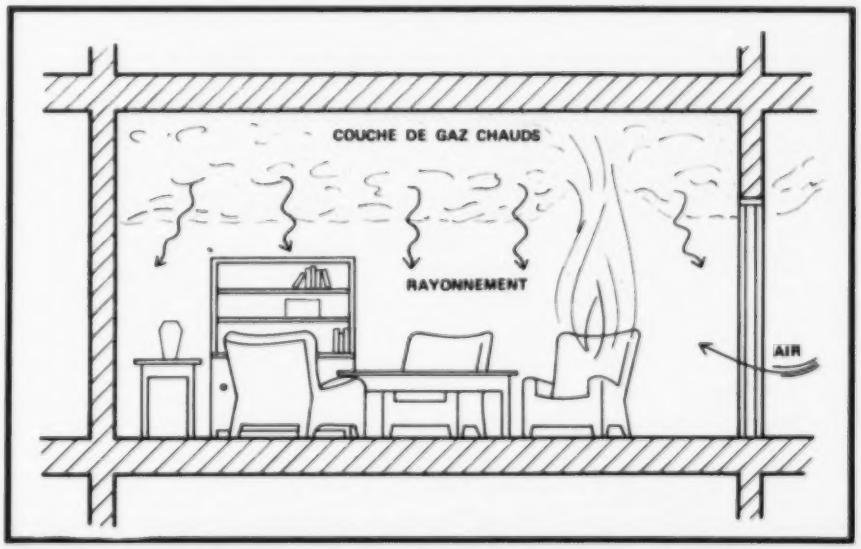


Figure 2 Évolution d'un incendie en lieu clos



moyenne des gaz dans la pièce. La figure 3 illustre trois étapes de ce type d'incendie :

1) le développement ou l'étape qui précède l'embrasement général, durant laquelle la température est faible et l'incendie est localisé à son lieu d'origine;

2) le foyer en pleine combustion ou l'étape après l'embrasement général, lorsque tous les matériaux combustibles se trouvant dans le local sont impliqués et les flammes semblent occuper l'espace au complet;

3) la décroissance ou période de refroidissement.

La ligne en tirets représente une situation où le premier article brûle complètement avant l'embrasement général. Dans les immeubles d'appartements de un et deux étages, seulement 22 % des incendies atteignent le stade de l'embrasement général (d'après l'analyse de données américaines obtenues du National Fire Incident Reporting System). La période qui précède l'embrasement dure de cinq à vingt minutes, le foyer en pleine combustion dure entre vingt et quarante minutes et la période de refroidissement dure plus d'une heure.

Le développement d'un incendie au stade qui précède l'embrasement général serait le même que celui décrit ci-dessus si les murs et le plafond étaient de construction incombustible. Dans un scénario différent, le dernier élément important à prendre feu est un mur ou le plafond. Supposons par exemple que l'incendie prenne naissance dans une corbeille à papier située dans un coin d'une pièce dont les murs sont recouverts de papier peint combustible. Si le mur est suffisamment inflammable, il prendra feu et les flammes se propageront verticalement dans le coin, selon l'indice de propagation de la flamme du mur. Si les flammes atteignent le plafond et se propagent le long de la partie supérieure du mur, il y a risque d'embrasement général. Ce qui est important lorsqu'on détermine la contribution d'un mur au développement d'un incendie, c'est son indice de propagation de la flamme.

Que le premier élément enflammé soit un meuble ou un mur, l'embrasement général est imminent si la température de la couche supérieure de la pièce atteint entre 500 et 600 °C[1]. Lorsque ces conditions sont présentes, il est certain que les occupants ont péri s'ils n'ont pas réussi à évacuer.

Données historiques

Une étude de cas d'incendies indique que les meubles et les revêtements intérieurs de finition combustibles peuvent contribuer de façon importante au développement des incendies. Jusqu'à récemment, il n'y avait aucun mécanisme de réglementation des matériaux d'ameublement. Néanmoins, il y a quelque temps, les organismes de rédaction des codes (qui ne peuvent réglementer que les matériaux utilisés dans la construction de bâtiments) ont vu la possibilité d'utiliser ces règlements pour favoriser un meilleur contrôle des pertes par le feu (y compris les décès).

Au cours des années 1940, plusieurs catastrophes aux États-Unis ont mis en lumière la nécessité de réglementer les revêtements intérieurs de finition dans les bâtiments[2,3]. Lors de l'incendie du Cocoanut Grove Night Club en 1942, 492 personnes ont péri lorsque le revêtement en coton du plafond a été la proie soudaine des flammes. Parmi les autres incendies majeurs de cette époque, mentionnons ceux de l'hôtel LaSalle, de l'hôtel Canfield et de l'hôtel Winecoff en 1946, ainsi que l'incendie de l'hôpital St. Anthony en 1949. L'ampleur des pertes lors de ces incendies était directement reliée à la vitesse de propagation de la flamme sur le revêtement de finition. De nombreuses pertes de vie ont été également attribuées à l'asphyxie. Ces catastrophes ont mis en évidence la nécessité de soumettre les matériaux à des essais et d'établir une classification en tenant compte de trois propriétés essentielles : propagation de la flamme, apport de combustible et pouvoir fumigène. Dans cet exposé, nous porterons une attention particulière à la propagation de la flamme.

L'essai en tunnel

En réponse aux besoins mentionnés plus haut, l'essai en tunnel a été mis au point par A. Steiner dans les installations de la Underwriters Laboratories Inc., aux États-Unis[3]. Cet essai est utilisé au Canada depuis 1960 pour vérifier si les matériaux sont conformes aux exigences du Code national du bâtiment[4].

L'appareil consiste en un tunnel horizontal de 7,6 m de long sur 450 mm de large et 300 mm de profondeur (figure 4). Le couvercle est amovible et est doté d'un revêtement intérieur en matériau de faible densité à base de substances

inorganiques. Les parois et le plancher sont fabriqués en briques réfractaires. L'une des parois est dotée de fenêtres d'observation.

Des flammes produites par deux brûleurs situés à l'une des extrémités du four d'essai sont soufflées vers l'intérieur par un courant d'air stable de 1,2 m/s. Ces flammes, d'environ 1,37 m de long, ont un dégagement de chaleur stable d'environ 90 kW, et touchent directement l'échantillon qui est monté soit sur le plancher ou au plafond du tunnel. Cette exposition est semblable en intensité à ce qui se produit lorsqu'un meuble de petites dimensions appuyé contre un mur est incendié. Le tunnel est étalonné en ajustant la vitesse de dégagement de la chaleur des brûleurs de sorte qu'il faille environ cinq minutes et demie aux flammes pour atteindre l'extrémité 'évent' du tunnel lorsque l'échantillon est en chêne rouge de 18 mm. Dans le conduit d'évacuation à l'extrémité du tunnel se trouvent une source lumineuse et un détecteur pour mesurer la fumée, ainsi qu'un thermocouple pour déterminer la chaleur dégagée.

Avant les essais, les échantillons doivent être conditionnés à une température de 23 ± 3 °C et à une humidité relative de 50 ± 5 % jusqu'à ce que leur masse se stabilise. Cela peut nécessiter plusieurs jours à plusieurs semaines selon le type de produit et sa teneur en eau initiale.

Au Canada, les matériaux de construction soumis à des essais sont montés et forment soit le plancher ou le plafond du tunnel. Si le matériau peut se maintenir seul en place ou être soutenu, il est monté au plafond et soumis aux essais en conformité avec la Norme nationale du Canada CAN4-S102-M83, Méthode d'essai normalisée – Caractéristiques de combustion superficielle des matériaux de construction et des assemblages[5]. Cependant, si le matériau est un revêtement de sol, ou qu'il ne peut être soumis à des essais fixé au plafond parce qu'il coule ou fond, ou qu'il a besoin d'être soutenu, il est soumis à des essais sur le plancher, conformément à la norme CAN4-S102.2-M83, Méthode d'essai normalisée – Caractéristiques de combustion superficielle des revêtements de sol et des divers matériaux et assemblages[6]. Les versions américaines de l'essai en tunnel ne permettent pas les essais de matériaux montés sur le plancher. (Il existe d'autres différences mineures entre les essais canadiens et américains.)

Indice de propagation de la flamme des matériaux

Pour déterminer l'indice de propagation de la flamme (IPF) d'un matériau, les brûleurs sont allumés et la progression de la flamme le long de l'échantillon est enregistrée durant dix minutes. Les méthodes détaillées de calcul de l'IPF sont décrites dans une annexe à la fin de cet exposé. Les méthodes de calcul sont conçues de manière à ce que l'IPF d'un panneau de matières inorganiques incombustible soit égal à zéro et celui d'un panneau de chêne rouge à cent. Les indices de tous les autres produits sont déterminés en fonction de ces deux valeurs.

Les courbes distance-temps du front des flammes pour le chêne rouge et le contreplaqué de sapin de Douglas sont illustrées à la figure 5, la courbe pour la plaque de plâtre de 12,7 mm à la figure 6, pour l'isolant cellulosique en vrac à la figure 7, et pour l'isolant de mousse de

Figure 4. Appareil d'essais en tunnel

polyuréthane à la figure 8. On constate des différences significatives dans la performance de ces matériaux durant les essais. Les méthodes de calcul de l'IPF ont été soigneusement conçues pour tenir compte de ces différences. À l'aide des données présentées aux figures 5 à 8, on a établi que l'IPF du chêne rouge était de 100, celui du contreplaqué de sapin de Douglas de 135; la plaque de plâtre de 12,7 mm a un indice de 15, l'isolant cellulosique en vrac de 55, et l'isolant de mousse de polyuréthane de 427.

Au fil des années, l'expérience a montré que les résultats pouvaient varier d'un essai à l'autre pour le même matériau. Pour cette raison, il est courant de procéder à trois essais d'échantillons d'un produit et de déterminer l'IPF en calculant la moyenne des trois. Néanmoins, on a constaté que l'IPF donne une classification des matériaux de revêtement qui reflète leur performance lors d'incendies réels. Règle générale, plus l'IPF est élevé, plus le développement de l'incendie est rapide.

Les lacunes de l'essai en tunnel

Bien que l'essai en tunnel soit utile dans la sélection des matériaux résistant au feu, il comporte des lacunes. Les conditions lors d'incendies réels diffèrent de celles des essais; on n'est pas toujours certain que la performance des matériaux sur le terrain puisse être déterminée en fonction de leur performance lors de l'essai en tunnel. Par exemple, la performance d'un isolant thermique lors de l'essai en tunnel ne ressemble guère à son comportement dans un mur creux lors d'un incendie dans la cavité. Même pour les matériaux de revêtement, il est parfois difficile d'interpréter les résultats de l'essai en tunnel; dans ces cas, un autre essai est utilisé, celui de la norme des Laboratoires des assureurs du Canada ULC-S127-M82, Standard Corner Wall Method of Test for Flammability Characteristics of Non-Melting Building Materials[8]. La recherche fondamentale sur le développement de l'incendie a mis en lumière la nécessité d'obtenir des données plus détaillées que celles fournies par l'essai en tunnel afin de prédire avec plus de précision la propagation de la flamme.

Essais de produits et résultats

Quatre laboratoires canadiens sont en mesure d'effectuer des essais en tunnel :

- Le Conseil national de recherches du Canada (CNRC), Ottawa, Ontario (règle générale, le CNRC n'effectue pas d'essais en tunnel sur une base commerciale),
- Ontario Research Foundation, Mississauga, Ontario,
- Les Laboratoires des assureurs du Canada, Scarborough, Ontario (2 tunnels),
- Les Services professionnels Warnock Hersey Ltée, Coquitlam, Colombie-Britannique.

Figure 5 Courbes distance-temps du chêne rouge et du contreplaqué de sapin de Douglas de 6 mm. La distance est mesurée à partir des brûleurs. L'aire sous A_1 = 43,0 m•min pour le chêne rouge et 47,2 m•min pour le contreplaqué.

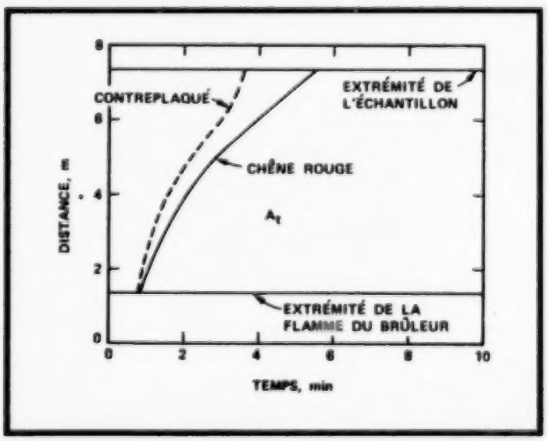
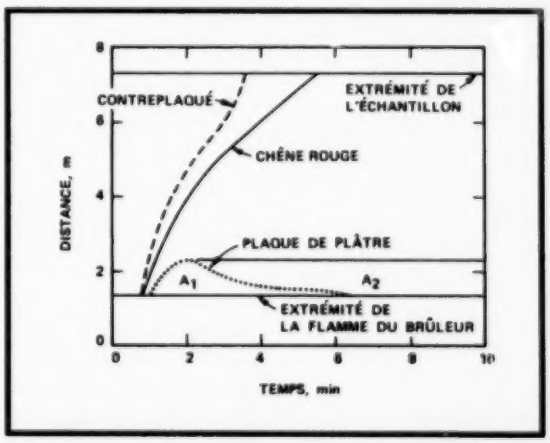


Figure 6 Courbes distance-temps du contreplaqué de sapin de Douglas de 6 mm, du chêne rouge de 18 mm et de la plaque de plâtre de 12,7 mm. Nota : dans l'essai de la plaque de plâtre, le front de la flamme s'avance jusqu'à la marque de deux minutes puis recule. L'aire sous la courbe est représentée ainsi : $A_1 = A_1 + A_2$ = 8,0 m•min.



Les Laboratoires des assureurs du Canada et Warnock Hersey offrent également des programmes d'homologation. Ils effectuent l'essai de produits pour le compte de fabricants et transmettent les résultats dans des publications courantes, offertes au public[9,10].

Après de nombreuses années d'essais, une importante quantité de données ont été recueillies sur la performance des matériaux de finition intérieure des murs. Certaines de ces informations sont résumées au tableau 1, qui est une version simplifiée du tableau 3.1.A. du Supplément du Code national du bâtiment 1985[11]. Ces indices ne s'appliquent qu'aux matériaux génériques conformes aux normes auxquelles le Supplément fait référence. Les IPF des matériaux qui ressemblent à ceux mentionnés dans le tableau, mais qui en réalité ne sont pas conformes à ces normes, peuvent être très différents de ceux donnés dans le tableau.

Exigences des codes du bâtiment

Les exigences relatives à l'indice de propagation de la flamme des matériaux de finition intérieure sont contenues dans le Code national du bâtiment 1985[12]. Pour les bâtiments qui doivent se conformer à la partie 3, ces exigences sont contenues à la sous-section 3.1.11; pour ceux qui doivent se conformer à la partie 9, il faut consulter la sous-section 9.10.16.

L'objectif de ces exigences est de s'assurer que dans l'éventualité où les murs et les plafonds seraient la proie d'un incendie dans sa phase initiale, ils empêcheraient les flammes de se propager si rapidement que les occupants ne pourraient pas évacuer. Règle générale, plus l'indice de propagation de la flamme d'un mur ou d'un plafond est faible, plus le temps dont disposent les occupants pour évacuer est long. Le temps requis pour l'évacuation dépend de la dimension du bâtiment, de l'emplacement de l'incendie dans le bâtiment, de la mobilité et du niveau de conscience des occupants, ainsi que de la présence ou de l'absence d'extincteurs automatiques à eau.

Dans de nombreux endroits présentant des risques élevés pour les occupants, comme les issues, les indices de propagation de la flamme des murs et des plafonds ne doivent pas être supérieurs à 25. Cette valeur a été établie parce qu'elle se rapproche de l'indice de la plaque de plâtre, matériau considéré comme sûr pour cet usage. En pratique, tout matériau de revêtement offrant une performance égale ou supérieure à la plaque de plâtre est autorisé.

Dans les hôpitaux et les prisons, où les occupants ont une mobilité ou un niveau de conscience limité, ainsi que dans les cinémas, où l'évacuation peut se faire lentement en raison d'un manque de direction, les murs et les plafonds doivent avoir un indice de propagation de la flamme inférieur ou égal à 76 pour assurer un temps d'évacuation suffisant; s'il y a des extincteurs automatiques à eau, l'indice de propagation de la flamme peut être augmenté à 150, car les extincteurs automatiques limitent la propagation de l'incendie et augmentent le temps disponible pour évacuer.

Figure 7 Exemple de courbe distance-temps montrant un recul du front de la flamme, puis une progression en avant

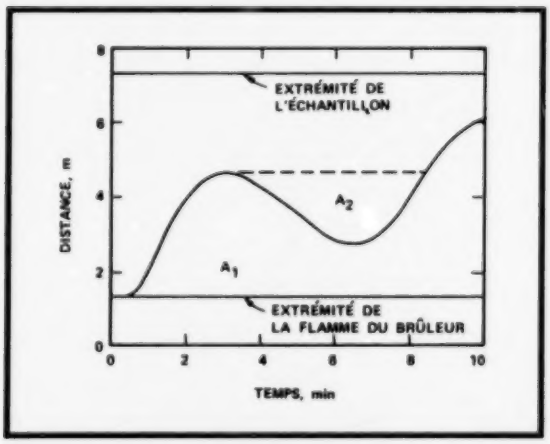


Figure 8 Courbe distance-temps d'une mousse de polyuréthane. Nota : la flamme s'avance dès le début de l'essai. La distance d = 3,7 m et le temps t = 0,8 min.

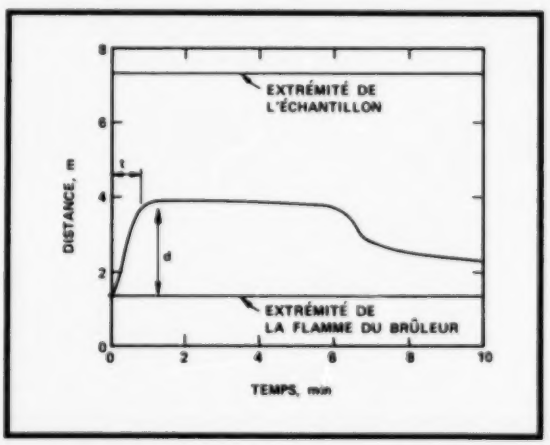


Tableau 1 Indices de propagation de la flamme des matériaux de finition intérieure des murs et des plafonds recouverts ou non d'une couche de finition

Matériau	Épaisseur minimale, en mm	Matériau brut	Peinture ou vernis de 1,3 mm d'épaisseur au plus. Papier peint cellulosique, 1 épaisseur
Plaque d'amiante-ciment	aucune	0	25
Brique béton carrelage	aucune	0	25
Acier, cuivre aluminium	0,33	0	25
Enduit	aucune	0	25
Plaque de plâtre	9,5	25	25
Bois	16	150	150
Contreplaqué de sapin de Douglas	11	150	150
Contreplaqué de peuplier	11	150	150
Contreplaqué avec placage d'épinette	11	150	150
Contreplaqué de sapin de Douglas	6	150	150
Panneau de fibres de faible masse volumique	11	>150	150
Panneau de fibres dur, type 1	9	150	*
ordinaire	6	150	150
Panneau de particules	12,7	150	*

*Insuffisance de résultats d'essais

Comme autre exemple, les matériaux de finition intérieure des murs d'appartements dans les immeubles en hauteur doivent avoir un indice de propagation de la flamme ne dépassant pas 150. Cette valeur a été choisie parce qu'elle se rapproche de celle du contreplaqué de sapin de Douglas de 6 mm, considéré comme acceptable sur la base de l'expérience en matière d'incendie. En pratique, tout matériau de revêtement offrant une performance égale ou supérieure au contreplaqué de sapin de Douglas de 6 mm est permis.

Une autre façon d'examiner les exigences des codes du bâtiment est de considérer les options d'évacuation. Règle générale, les murs des pièces peuvent avoir un IPF de 150, les murs des corridors conduisant aux issues un IPF de 75, et les murs des issues un IPF de seulement 25. Les exigences les moins rigoureuses sont celles de la pièce, étant donné que l'occupant peut s'enfuir du local en feu et trouver refuge à un autre endroit dans le bâtiment ou à l'extérieur. Des exigences plus strictes s'appliquent dans le cas

des corridors, puisqu'un incendie grave à cet endroit pourrait empêcher les occupants d'un étage d'évacuer. Les indices les plus faibles sont ceux des matériaux utilisés dans les issues, car un incendie grave à cet endroit pourrait empêcher tous les occupants du bâtiment d'évacuer.

Objets mobiliers combustibles

Le développement en phase initiale d'un incendie dans une pièce n'est pas toujours attribuable à la propagation des flammes le long des murs et des plafonds. Les objets mobiliers contribuent davantage au développement en phase initiale[13]. Comme nous l'avons mentionné précédemment, si un meuble ou un mur brûle suffisamment rapidement pour que la température dans la partie supérieure de la pièce atteigne entre 500 et 600 °C, l'embrasement général se produira.

Un taux critique de dégagement de chaleur (ou taux de combustion critique) doit être dépassé (et maintenu durant une certaine période de temps) avant que l'embrasement général ne se produise dans une pièce[14]. La température de la pièce ne peut continuer à augmenter que si le taux de production de chaleur (dégagement) dans la pièce est plus élevé que la somme des débits de perte de chaleur de la pièce. On peut donc formuler l'équation suivante :

Augmentation de température si

taux de dégagement de chaleur	>	débit de perte de chaleur aux parois	+	débit de perte de chaleur par les ouvertures

Selon un modèle simple, le taux critique de dégagement de chaleur provoquant l'embrasement général, dans une pièce donnée, dépend principalement :

- de la surface totale des parois de la pièce,
- des propriétés thermiques des parois de la pièce,
- de la dimension et de la forme des ouvertures, et
- du temps de combustion du premier objet enflammé[14].

Pour les pièces types d'un appartement, le taux critique de dégagement de chaleur est habituellement d'environ 1 MW.

Les fauteuils rembourrés ont des taux de dégagement de chaleur variant entre 0,4 et 2,5 MW lorsqu'ils brûlent[15], de sorte que certains fauteuils rembourrés provoquent l'embrasement général et d'autres non. Il serait donc possible, en principe, de choisir des meubles 'sûrs' (qui n'occasionneraient pas l'embrasement général). Cependant, cette théorie a besoin d'être approfondie et il n'est pas dit que la société ou l'industrie accepteraient de telles limites. De toute façon, il y a lieu de mettre au point des moyens permettant de déterminer le taux de dégagement de chaleur des objets mobiliers en combustion.

Essais de combustion en salle

Afin d'accroître nos connaissances sur le développement de l'incendie avant l'embrasement général, l'ASTM[16] et l'ISO[17] sont à mettre au point des essais normalisés en salle. Ces essais ont d'abord pour but d'évaluer dans quelle mesure les murs et les plafonds combustibles contribuent au développement d'un incendie de local.

Les essais sont réalisés dans un local de 2,4 sur 3,6 m, et d'une hauteur de 2,4 m. Les murs ou le plafond sont recouverts du matériau de revêtement intérieur de finition soumis aux essais. L'expérience débute lorsqu'une charge combustible est allumée dans un coin de la pièce autrement vide. Durant cette phase initiale, l'intensité du feu n'est pas suffisante pour provoquer l'embrasement général; celui-ci ne peut se produire que lorsque les murs ou le plafond sont la proie des flammes. Au cours de l'expérience, on mesure la propagation maximale de l'incendie le long des murs et du plafond combustibles, les taux de dégagement de fumée et de gaz toxiques et, s'il y a lieu, le temps écoulé avant l'embrasement général. Plus important encore, le taux de dégagement de chaleur du matériau en combustion est déterminé.

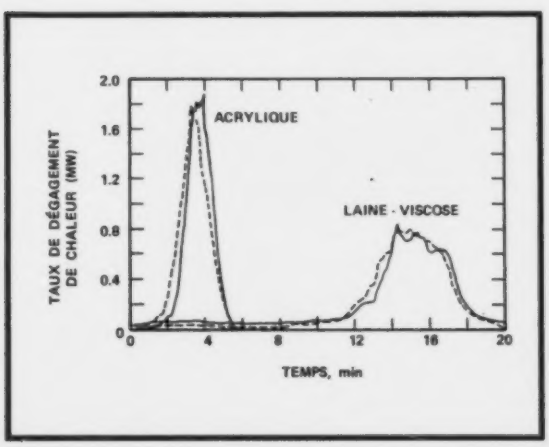
La performance au feu de ces produits lors de ces expériences à grande échelle est comparée à leur performance lors d'essais d'inflammabilité à échelle réduite. Ces comparaisons peuvent servir à mettre au point ou à modifier les essais à échelle réduite. Les résultats peuvent également être utiles pour l'élaboration de modèles mathématiques servant à prédire le déroulement des feux de locaux.

Les expériences de combustion en salle ont permis de mettre en lumière l'utilité de l'indice

de propagation de la flamme des matériaux, déterminé à l'aide de l'essai en tunnel. Lorsque les murs d'une pièce sont recouverts de plaques de plâtre (IPF = 15) et qu'une petite source d'inflammation (environ 100 kW, soit l'équivalent en intensité d'un grave incendie de corbeille à papier) est placée dans un coin de la pièce, il n'y a pas d'embrasement général[3]. Les occupants disposent de suffisamment de temps pour évacuer. D'un autre côté, dans une pièce dont les murs et le plafond sont recouverts de contreplaqué de sapin de Douglas de 6 mm (IPF ~ 135), le temps écoulé avant l'embrasement général n'est que de trois minutes ou moins, en supposant que la source d'inflammation est la même[16]. La période d'évacuation se trouve grandement réduite. Dans une pièce dont les murs sont revêtus de mousse de polyuréthane (IPF ~ 500), il peut s'écouler aussi peu que 13 secondes avant que le brasier n'atteigne le stade de l'embrasement général[3], ce qui signifie que le temps d'évacuation est pratiquement nul. C'est pourquoi les codes du bâtiment exigent que ce type d'isolant soit recouvert d'une barrière thermique protectrice.

Des efforts sont déjà déployés en vue d'élargir le champ d'application de la méthode d'essai de manière à inclure la contribution des objets mobiliers au développement de l'incendie. En Suède, des expériences de combustion en salle réalisées à l'aide de deux canapés enflammés par des copeaux de bois de 40 g ont produit des résultats intéressants[17]. La figure 9 montre les taux de dégagement de chaleur de deux canapés avec rembourrage de polyuréthane non traité; l'un est recouvert de tissu en acrylique et l'autre d'un mélange laine-viscose. On constate une nette différence dans leur comportement au feu. Les flammes se propagent très rapidement dans le cas du canapé recouvert de tissu en acrylique et le taux de combustion maximal est atteint au bout de quatre minutes. Dans l'autre cas, le tissu en laine et viscose protège le rembourrage et le feu se développe très lentement, l'intensité maximale étant deux fois moindre que celle du tissu en acrylique au bout de quatorze minutes. Les deux canapés ont été complètement détruits par le feu et ont provoqué chacun l'embrasement général, mais à des périodes de temps très différentes. É demment, le temps disponible pour l'évacuation de ce local serait également très différent dans les deux cas.

Figure 9 Taux de dégagement de chaleur par rapport au temps pour deux canapés mis à l'essai dans un local standard. Les lignes en tirets et pleine montrent les résultats de deux méthodes distinctes pour déterminer les taux de dégagement de chaleur (dessin d'après Wickström et al., réf. 17).



L'avenir des essais de combustion en salle comme méthode d'analyse de la performance des produits en situation réelle s'annonce des plus prometteurs. Ils permettent d'obtenir une indication précise du temps d'évacuation mis à la disposition des occupants. Malheureusement, ces essais sont coûteux et on ne peut modéliser qu'une situation à la fois.

Modélisation par ordinateur

Au cours des dernières années, de nombreux efforts ont été déployés pour la mise au point de modèles mathématiques servant à prédire divers aspects du comportement du feu dans les bâtiments. Un domaine d'activités intenses est celui de la mise au point de modèles pour prédire les vitesses de développement de l'incendie, ainsi que le dégagement et le mouvement de la fumée lors d'incendies. Ces modèles peuvent servir à prévoir le temps disponible pour l'évacuation avant que les conditions dans la pièce ou le bâtiment ne deviennent intenables. Ces modèles proposent une analyse de rentabilité pour analyser l'effet du choix des matériaux ou de la conception du bâtiment sur la sécurité incendie.

Il existe deux méthodes principales de modélisation mathématique des incendies : la modélisation probabiliste et la modélisation déterministe. Les modèles probabilistes décrivent le développement d'un incendie selon une série d'événements (inflammation, propagation de la flamme, embrasement général, etc.) et prédisent la transition d'un événement à un autre au moyen de probabilités[19]. Ces modèles sont basés sur des années d'expérience mais ils

ne tiennent pas vraiment compte des principes fondamentaux de physique et de chimie qui entrent en jeu dans les feux de locaux. En ce qui concerne les modèles déterministes, le problème et la configuration sont prescrits, et les lois de la physique et de la chimie dictent l'évolution de l'incendie. Les deux modèles consistent en une série d'équations mathématiques qui doivent être résolues simultanément. Bien souvent, cela n'est possible que par l'utilisation d'un ordinateur.

Les modèles déterministes peuvent être subdivisés en modèles par secteur et en modèles par zone. Dans la modélisation par secteur, les conditions à chaque point de l'espace, en tout temps, sont données par les solutions à un ensemble complexe d'équations différentielles partielles. Règle générale, les modèles par zone exigent énormément de puissance de l'ordinateur. Dans les modèles par zone, le compartiment résistant au feu est divisé en zones et les interactions (transferts de masse et de chaleur) entre les zones font l'objet de modèles. Bien qu'ils soient en voie d'élaboration, certains sont présentement utilisés pour résoudre des problèmes relatifs à la sécurité incendie.

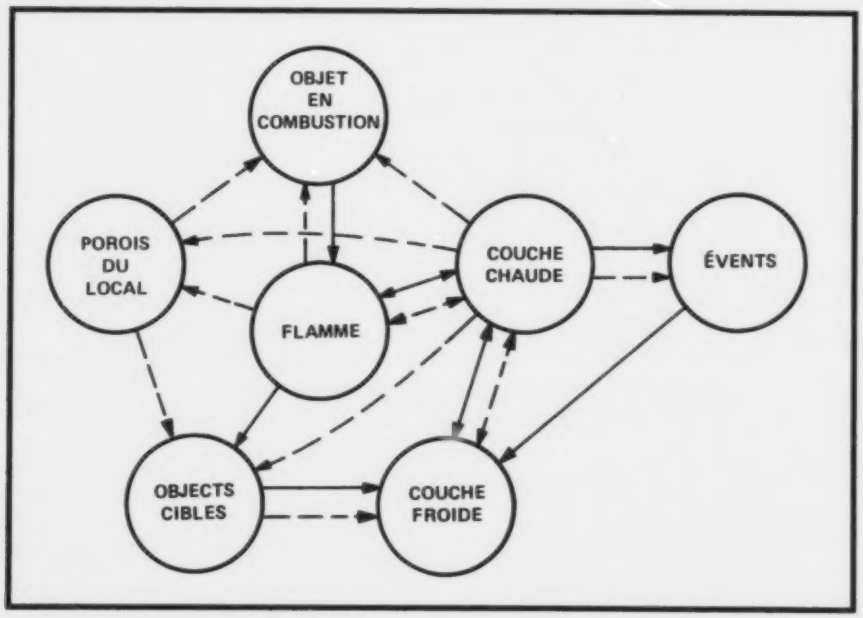
Dans un modèle par zone d'un feu de local, les zones pertinentes pourraient être le corps en combustion, la flamme, la couche de chaleur, la couche froide, les évents (ouvertures), les objets cibles (qui n'ont pas encore pris feu) et les parois. Les diverses interactions physiques importantes entre les zones sont décrites à la figure 10. Par exemple, la chaleur est transférée de la flamme, de la couche supérieure et des parois de la pièce à l'objet en combustion. Cette chaleur entraîne la pyrolyse de l'objet et les gaz volatils sont transférés à la flamme. Des relations de cette nature doivent être élaborées pour chaque zone. Le modèle par zone consiste en une série d'équations décrivant les interactions entre les zones.

Plusieurs modèles par zone existent, selon la situation que l'on doit simuler. Certains sont conçus pour les feux de locaux[20,21], d'autres simulent le déplacement de la fumée et la propagation de l'incendie dans tout le bâtiment[22]. Certains s'intéressent seulement au temps disponible pour l'évacuation[23], d'autres au comportement au feu, de l'inflammation à l'extinction. Tout modèle ne devrait servir qu'aux fins pour lesquelles il a été conçu, et seulement lorsqu'il a été validé. L'une des grandes difficultés liées à l'utilisation de modèles consiste à trouver les données d'entrée nécessaires.

Harvard Mark 5

Mis au point à l'Université Harvard par H. Emmons et H. Mitler, le Harvard Mark 5 est

Figure 10 Interactions des éléments d'un modèle de feu de local; --- transfert de chaleur, — transfert de masse



l'un des modèles les plus connus[20]. Il s'agit d'un modèle déterministe par zone des plus complets servant à prédire la dynamique des feux de local. Dans sa forme actuelle, il ne s'intéresse pas directement à la sécurité des occupants se trouvant dans la zone immédiate.

La situation modélisée comprend une pièce de n'importe quelle dimension, dotée de un à cinq évents dans les murs, et contenant un maximum de cinq objets. Un de ces objets (par exemple un matelas) est incendié et le comportement du feu subséquent dans la pièce fait l'objet de prédictions. Le modèle a recours aux propriétés thermophysiques des matériaux comme données d'entrée pour les calculs. On a déterminé que le modèle pouvait prédire avec certain succès les conséquences d'une série de feux de chambre réalisés à la Factory Mutual Research Corporation[20].

Parmi les améliorations récentes apportées au modèle, mentionnons les dispositions relatives à la combustion des murs et des plafonds, à la possibilité d'une ventilation à air forcé ou aux incendies de locaux multiples. Le modèle a été utilisé à plusieurs reprises à des fins d'analyses médico-légales lors d'incendies comme ceux de l'hôtel MGM et du Beverly Hills Supper Club.

ASET (Available Safe Egress Time)

Mis au point au National Bureau of Standards (É.-U.) par L.Y. Cooper, ASET[22] est un modèle déterministe par zone qui prédit le temps disponible pour l'évacuation sans danger de tous les occupants d'un compartiment en cas d'incendie. Ce temps correspond à la période qui s'écoule entre la détection de l'incendie et la présence de conditions dangereuses. Dans ce modèle, le processus de développement de l'incendie n'est pas traité avec autant de rigueur que dans le modèle Mark 5. Cependant, contrairement à Mark 5, ASET est rédigé de manière à ce qu'on puisse prédire le temps nécessaire à la détection de l'incendie et d'apparition de conditions dangereuses pour les occupants.

Équivalents et considérations au niveau de la conception

Les exigences des codes sont conçues pour assurer un degré minimum acceptable de sécurité. D'autres solutions offrant un degré de sécurité égal ou supérieur sont permises en vertu de la section 2.5 du CNB.

Il est clair que les exigences relatives à la propagation de la flamme sont conçues pour s'assurer que tous les occupants de la zone immédiate disposent de suffisamment de temps pour l'évacuation et pour donner aux pompiers plus de temps pour intervenir. Cependant, le temps exact prévu par une exigence est habituellement inconnu, c'est-à-dire que le degré de sécurité exigé n'est pas quantifié.

Les exemples qui suivent ont pour but de montrer comment des solutions de remplacement peuvent être appliquées.

Exemple 1

Une entreprise construisant un immeuble de bureaux en hauteur désire recouvrir les murs d'une petite salle de réunion d'un produit qu'elle fabrique; ce produit a un indice de propagation de la flamme de 160. Selon le CNB, seuls les produits ayant un IPF de 150 ou moins sont permis. La compagnie est prête à payer les coûts de dispositifs de protection incendie additionnels pour mettre au point un produit assurant une protection équivalant à celle exigée par le CNB.

Plusieurs possibilités existent. L'une serait de doter la pièce d'extincteurs automatiques à eau pour éteindre l'incendie rapidement et permettre aux occupants d'évacuer sans danger. Cependant, il n'est probablement pas rentable de prévoir des extincteurs automatiques à eau dans cette pièce alors que le reste du bâtiment en est dépourvu. En outre, certains trouvent que l'action de l'eau pulvérisée peut présenter des dangers additionnels relatifs au déplacement de la fumée.

Une autre méthode consisterait à installer des détecteurs de fumée dans la pièce pour s'assurer que l'évacuation commence plus rapidement qu'on ne s'y attendrait autrement si la pièce n'était pas pourvue de détection automatique. Pour empêcher que les flammes et la fumée ne se propagent à l'extérieur de la pièce, on pourrait installer des portes à fermeture automatique avec un degré de résistance au feu plus élevé que celui exigé par le Code.

Les modèles mathématiques peuvent aussi aider grandement à évaluer les équivalences ci-dessus. On peut se servir de ces modèles pour déterminer le temps d'évacuation dont disposent les occupants, ainsi que le moment où l'on peut s'attendre à ce que le feu se propage à l'extérieur

du local de réunion. Si la solution proposée assure à ces deux points de vue autant ou plus de temps que celle du code du bâtiment, on peut raisonnablement conclure que le niveau de sécurité est équivalent.

Exemple 2

Les autorités carcérales ont appris qu'une gamme de meubles de prison moins coûteux est maintenant offerte sur le marché. Elles sont intéressées à remplacer l'ameublement existant mais se demandent si cette nouvelle gamme assure une protection suffisante contre l'incendie. Malheureusement, le CNB ne contient aucune exigence relative au choix de l'ameublement.

Les autorités carcérales sont d'avis que le mobilier existant offre un degré de sécurité acceptable. Plusieurs incendies impliquant le mobilier existant se sont produits et aucun n'a entraîné de pertes sérieuses en vies humaines et en biens.

Étant donné que les matériaux autorisés à l'intérieur d'une cellule de prison sont limités et que la disposition des meubles peut être contrôlée, il est possible de concevoir des essais de combustion en salle qui puissent comparer la performance relative des meubles nouveaux et existants à l'intérieur d'une prison. En choisissant une source probable d'inflammation, on peut comparer la résistance à l'inflammation des deux gammes d'ameublement. De plus, le temps qui s'écoule avant l'apparition de conditions dangereuses à l'intérieur d'une cellule ou d'une salle peut être déterminé. Si la nouvelle gamme de meubles offre une performance égale ou supérieure à la gamme existante, il serait sage de la remplacer. Par contre, si la nouvelle gamme offre une performance nettement inférieure à la gamme existante, il faut songer aux incendies graves que pourrait entraîner ce changement.

Résumé

On a examiné la relation entre les essais d'inflammabilité des matériaux de construction et du contenu du bâtiment et les exigences du Code national du bâtiment. On a montré que la pratique de baser les exigences en matière de sécurité incendie relatives aux matériaux de finition intérieure sur leur performance lors de l'essai en tunnel, comme cela se fait au Canada depuis 1960, est justifiée. D'autre part, les développements récents au plan des recherches sur le feu, surtout dans le domaine des essais de combustion en salle et de la modélisation par ordinateur, entraîneront probablement la mise au point d'exigences plus précises au niveau de l'inflammabilité des matériaux de construction et de l'ameublement et permettront d'améliorer la conception des bâtiments en fonction de la sécurité incendie.

Références

1. Peacock, R.D., et J.N. Breese, 1982. *Computer fire modelling for the prediction of flashover,* NBSIR 82-2516, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD.

2. Moulton, R.S., 1961. *Interior finish for life safety from fire,* NFPA Quarterly, vol. 55, n° 1, pp. 43-50.

3. Abrams, M.S., M.V. D'Souza, P. Higginson, W.W. Metes, J.G. Quintiere, W.J. Parker, R.F. Robbins et J.A. White fils, 1985. *Review of ASTM test for surface burning characteristics of building material (E84)* (An ASTM White Paper), Journal of Testing and Evaluation, vol. 13, n° 2, pp. 89-114.

4. Code national du bâtiment du Canada 1960. Comité associé du Code national du bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa, CNRC 5800F.

5. Méthode d'essai normalisée – Caractéristiques de combustion superficielle des matériaux de construction et des assemblages, 1983. Laboratoires des assureurs du Canada, Norme ULC CAN4-S102-M83, Scarborough, Ontario, 30 p.

6. Méthode d'essai normalisée – Caractéristiques de combustion superficielle des revêtements de sol et des divers matériaux et assemblages, 1983. Laboratoires des assureurs du Canada, Norme ULC CAN4-S102.2-M83, Scarborough, Ontario, 25 p.

7. Mehaffey, J.R., 1986. *Fire performance of combustible insulation in buildings,* in Proceedings of the 30th Annual Technical/ Marketing Conference – Polyurethanes, Exploring New Horizons, coparrainée par la Division polyuréthane et la Division mousse rigide de la SIPC, Toronto, 7 p.

8. Standard Corner Wall Method of Test for Flammability Characteristics of Non-Melting Building Materials, 1982. Laboratoires des assureurs du Canada, ULC-S127-M82, Scarborough, Ontario, 9 p.

9. List of Equipment and Materials, 1986. Volume II Building Construction, Laboratoires des assureurs du Canada, Scarborough, Ontario, 709 p.

10. Fire Laboratories Listings, 1986. Services professionnels Warnock Hersey Ltée, Mississauga, Ontario.

11. Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1985. Comité associé du Code national du bâtiment du Canada, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, CNRC 23178F, 290 p.

12. Code national du bâtiment du Canada 1985. Comité associé du Code national du bâtiment, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, CNRC 23174F, 487 p.

13. Phillips, D., et M.A. Kasem, 1985. Upholstered Furniture Fires in Canada, Consommation et Corporations Canada, Ottawa, L10127-F32, 84/85, 29 p.

14. McCaffrey, B.J., J.G. Quintiere et M.F. Harkleroad, 1981. *Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations,* Fire Technology, vol. 17, pp. 98-119.

15. Babrauskas, V., 1985. *Upholstered furniture. Heat release rates: measurements and estimation,* Journal of Fire Sciences, vol. 1, pp. 9-32.

16. Proposed Method for Room Fire Test of Wall and Ceiling Materials and Assemblies, 1982. Annual Book of ASTM Standards, Part 18, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, pp. 1618-38.

17. Wickström, U., B.B. Sundstrom et G. Holmstedt, 1983. *The development of a full-scale room fire test,* Fire Safety Journal, vol. 5, pp 191-7.

18. Fisher, F.L. et R.B. Williamson, 1983. Intralaboratory Evaluation of a Room Fire Test Method, NBS-GCR-83-421, National Bureau of Standards (USA), Gaithersburg, MD, 110 p.

19. Fahy, R.F., 1985. *Building fire simulation model. An overview,* Fire Safety Journal, vol. 9, pp. 189-203.

20. Mitler, H.E., 1985. *The Harvard fire model,* Fire Safety Journal, vol. 9, pp. 7-16.

21. Smith, E.E., 1985. *Computer based hazard assessment using release rate test data,* Fire Safety Journal, vol. 9, pp. 47-54.

22. Jones, W.W., *A multicomponent model for the spread of fire, smoke and toxic gases,* Fire Safety Journal, vol. 9, pp. 55-80.

23. Cooper, L.Y. et D.W. Stroup, 1985. *ASET – A computer program for calculating available safe egress time,* Fire Safety Journal, vol. 9, pp. 29-46.

Annexe A

Détermination de l'indice de propagation de la flamme

Pour déterminer l'indice de propagation de la flamme (IPF) d'un matériau, on allume les brûleurs et la progression du front des flammes est enregistrée durant une période de dix minutes. La courbe de la position du front des flammes en fonction du temps est ensuite tracée. Les courbes pour le chêne rouge et le contreplaqué de sapin de Douglas de 6 mm sont illustrées à la figure 5. L'aire en dessous de la courbe du temps en fonction de la distance de propagation de la flamme (A_t) est déterminée.

L'IPF_1 (remarquez l'indice 1) est défini en termes de l'aire A_t comme suit :

$IPF_1 = 1{,}85\ A_t$, si A_t est inférieure ou égale à 29,7 m•min

$IPF_1 = \dfrac{1640}{59{,}4 - A_t}$ si A_t est supérieure à 29,7 m•min

L'IPF_1 des matériaux incombustibles est de zéro, et celui du chêne rouge est de 100. Les valeurs de tous les autres produits sont déterminées en fonction de ces matériaux. À l'aide des résultats indiqués à la figure 5 pour le contreplaqué de sapin de Douglas de 6 mm, on a établi son IPF_1 à 135. (L'IPF_1 n'est pas une mesure directe de la vitesse de propagation de la flamme. Cependant, plus la flamme se propage rapidement à l'extrémité du tunnel, plus la valeur de A_t, et par conséquent l'IPF_1, est élevée.)

Pour certains produits, le front des flammes peut se propager rapidement au début de l'essai, puis ralentir. Par exemple, la courbe du front des flammes en fonction du temps de la plaque de plâtre de 12,7 mm est indiquée à la figure 6. La flamme s'est propagée sur une distance de 2,3 m en deux minutes, puis elle a régressé. L'aire est calculée comme s'il n'y avait pas eu de régression, et A_t représente la somme de A_1 et A_2. À l'aide des résultats d'essai indiqués à la figure 6 pour la plaque de plâtre, on a établi son IPF_1 à 15.

À l'occasion, le front des flammes peut ralentir pendant un certain temps, puis se propager à nouveau lorsque, par exemple, un échantillon d'isolant cellulosique en vrac est soumis à des essais. Dans l'essai illustré à la figure 7, la flamme s'est propagée sur une distance de 4,7 m pendant trois minutes, a régressé, puis a repris sa progression. L'aire est calculée comme si la flamme s'était propagée sur une distance de 4,7 m en trois minutes, puis s'était arrêtée à 4,7 m jusqu'à ce que le front dépasse de nouveau 4,7 m (voir les lignes pointillées). L'aire (A_t) utilisée pour établir l'indice de propagation de la flamme (IPF_1) représente la somme des aires A_1 et A_2 de la figure 7.

L'IPF_1 calculé à partir de l'essai en tunnel donne une classification des matériaux qui est censée refléter leur performance lors d'un incendie réel. Pour les produits à base de bois, cette hypothèse est valide. Cependant, on s'est rendu compte au début des années 70 que de nombreux isolants de mousses plastiques avec un IPF_1 faible pouvaient propager rapidement les flammes une fois enflammés, s'ils étaient utilisés comme revêtement de plafond ou de mur sans barrière thermique protectrice.

Au Canada, les normes de l'essai en tunnel ont été modifiées en 1978 pour tenir compte du comportement inhabituel des isolants de mousses plastiques lors des conditions d'essai[A2,A3]. Des études plus poussées effectuées au CNRC ont révélé que le front des flammes progresse rapidement au début de l'essai puis ralentit et, dans certains cas, s'arrête ou régresse jusqu'à la fin de l'essai. Comme la propagation rapide de la flamme est d'importance vitale dans le développement d'un incendie réel, l'utilisation d'une équation qui tienne compte de l'importance de cette propagation initiale a été proposée.

Un second IPF, pour les isolants de mousses plastiques (IPF_2), est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$IPF_2 = 92{,}3\ d/t \qquad (2)$$

où t représente le temps en minutes nécessaire au front des flammes pour se propager sur une distance d mesurée en mètres jusqu'à un ralentissement considérable de sa vitesse. Bien que l'application de ce concept pose quelques problèmes, cette équation permet d'obtenir une classification des isolants de mousses plastiques qui se rapproche davantage de leur performance lors d'incendies réels.

À la figure 8, la courbe du front des flammes en fonction du temps pour la mousse de polyuréthane est illustrée. En comparaison avec les données des matériaux traditionnels des figures 6 et 7, la progression de la flamme le

long de l'échantillon de mousse a commencé plus tôt. Pour ce type de mousse, l'IPF_1 = 74 et l'IPF_2 = 427.

Lorsque la propagation de la flamme est telle qu'il est difficile d'établir le point où le front des flammes ralentit, l'indice de propagation de la flamme (IPF_3) doit être établi en tenant compte des résultats de l'essai effectué conformément à la norme ULC-S127-M, intitulée 'Standard Corner Wall Method of Test for Flammability Characteristics of Non-Melting Building Materials'[A1].

L'indice de propagation de la flamme (IPF) d'un échantillon doit être le plus élevé des trois indices IPF_1, IPF_2 et IPF_3.

Une attention particulière doit être apportée lorsqu'on compare l'indice de propagation d'un produit obtenu à la suite de l'essai effectué conformément à la norme CAN4-S102-M83 (échantillon fixé au plafond) à celui obtenu à la suite de l'essai en tunnel américain décrit dans la norme ASTM E-84[A4]. Dans les deux cas, la propagation du front des flammes est enregistrée, mais les formules pour calculer l'IPF à partir de ces données sont différentes. Pour la plupart des matériaux de construction, la formule de l'ASTM donne un IPF environ 8 % inférieur à celui de la formule canadienne; cependant, pour certains matériaux de faible inertie thermique (bons isolants thermiques), la valeur de la norme ASTM est nettement inférieure à celle de la norme canadienne. À partir des résultats des essais d'inflammation en coin, les scientifiques canadiens estiment que les formules canadiennes donnent une meilleure classification des matériaux de revêtement[A2,A3]. Règle générale, plus l'IPF est faible, plus le temps d'évacuation disponible est long dans l'éventualité où les murs seraient la proie des flammes.

Avec les matériaux thermoplastiques ou autres matériaux soumis à des essais en conformité avec la norme CAN4-S102.2-M83 (échantillon monté sur le plancher), il n'est pas possible de comparer les résultats à ceux obtenus avec la norme ASTM E-84, lorsque l'échantillon est fixé au plafond du tunnel. La performance de ces matériaux lors des deux essais est très différente; règle générale, elle est pire lors de l'essai canadien.

En plus de déterminer l'IPF des produits, le tunnel sert à déterminer les indices de dégagement de fumée. Ceux-ci ne sont importants que dans les bâtiments de grande hauteur.

Références

A1. Williamson, R.B. et F.M. Baron, 1973. *A corner fire test to simulate residential fire,* Journal of Fire and Flammability, Vol. 4, pp. 99-105.

A2. D'Souza, M.V. et J.H. McGuire, 1977. *ASTM E84 and the flammability of foamed thermosetting plastics,* Fire Technology, Vol. 13, pp. 85-94.

A3. D'Souza, M.V., *The basis for flammability test methods,* Second Symposium on Combustibility and Plastics, Société des industries du plastique du Canada, Ottawa.

A4. Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials, 1986. ASTM E-84, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.07, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, pp. 319-336.

Compartimentation et résistance au feu

Guy C. Gosselin, M.Sc., M.B.A., ing.

Introduction

L'exposé intitulé *Inflammabilité des matériaux de construction et développement du feu*[1] décrit la progression d'un feu de local type, à partir de la combustion d'un élément (un meuble ou une corbeille à papier) jusqu'au foyer en pleine combustion ou aux conditions après l'embrasement général, c'est-à-dire lorsque tous les matériaux combustibles de la pièce sont la proie des flammes. Les exigences du Code national du bâtiment[2] ayant comme objectif principal de retarder la possibilité d'un embrasement général y sont également traitées. Cependant, les restrictions concernant la combustibilité et l'inflammabilité des matériaux de construction ne garantissent pas toujours que l'incendie ne dépassera pas le stade de l'embrasement général; il existe peu de moyens de limiter l'inflammabilité du contenu d'un bâtiment (objets mobiliers) et, dans certains cas, il n'y a personne pour détecter l'incendie ou le contrer dans sa phase initiale. Une analyse récente des données obtenues du National Fire Incident Reporting System révèle qu'environ un incendie sur quatre atteint l'étape du foyer en pleine combustion.

Les conséquences des risques d'un embrasement général au niveau de la sécurité des personnes doivent être étudiées attentivement. Un incendie à l'étape qui précède l'embrasement général peut se propager à l'extérieur de la pièce d'origine si, par exemple, une porte ou une ouverture technique est laissée sans protection. Mais le risque que l'incendie se propage de la pièce au corridor et, par la suite, au reste du bâtiment, est plus élevé lorsque l'incendie atteint le stade qui suit l'embrasement général.

Cet exposé traite de la compartimentation, qui est une technique permettant de se protéger contre les dangers découlant d'un foyer en pleine combustion. Il identifie les objectifs de sécurité incendie pertinents, décrit le concept de manière pratique et indique les moyens acceptables d'évaluer la performance. On explique le concept de la compartimentation dans le cadre de l'approche du Code national du bâtiment face à la sécurité des personnes, et on donne certains exemples de la façon dont un concepteur devrait s'y prendre pour élaborer des solutions de rechange pertinentes aux exigences de compartimentation.

Objectifs de sécurité incendie

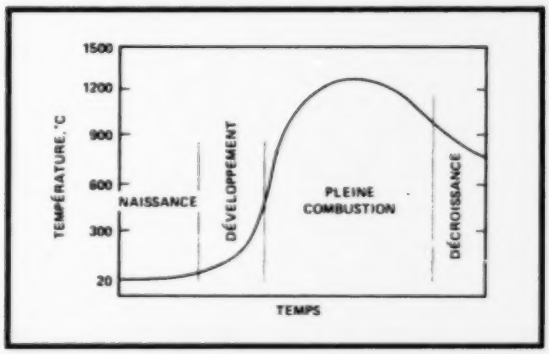
Dans le cas d'un foyer en pleine combustion, la sécurité des occupants à l'intérieur de la pièce d'origine n'est plus en question. La température moyenne se situe aux environs de 500 °C et atteint rapidement 800 à 1200 °C, comme l'illustre la figure 1. De plus, la quantité de combustible volatilisé et de produits de combustion résultant lorsqu'un objet mobilier (ex. : un fauteuil rembourré) brûle pourrait remplir un espace équivalant à un entrepôt de 15 000 mètres cubes en moins de vingt minutes. Un objectif logique serait de circonscrire l'incendie et les produits de combustion surchauffés au lieu d'origine. On pourrait en outre laisser l'incendie se propager aux autres pièces de l'étage et aux autres étages, pourvu que des mesures soient prises afin d'empêcher le feu de s'attaquer aux aires de refuge, soit les zones isolées pour l'usage des occupants dans de telles situations. Dans l'arbre des concepts de sécurité incendie, ce

concept s'appelle la maîtrise du mouvement du feu (voir figure 2)[3].

Les codes du bâtiment nord-américains ont recours à ces deux mesures de protection contre l'incendie (circonscription et isolation) pour assurer la sécurité des occupants. Communément appelées compartimentation, elles font appel à des barrières physiques pour retarder la propagation de l'incendie et permettre aux occupants de se mettre à l'abri et aux sapeurs-pompiers d'intervenir, d'établir un quartier général, d'entreprendre des recherches et des opérations de sauvetage, et de combattre l'incendie. En d'autres mots, la propagation de l'incendie est limitée au moyen de la construction, ce qui permet la réalisation des autres éléments de l'arbre de sécurité incendie. Cet aspect souligne la relation qui doit exister entre les diverses subdivisions de l'arbre afin d'améliorer la fiabilité de l'installation de protection contre l'incendie, sujet traité par Richardson dans son exposé intitulé *Sécurité incendie, données statistiques et règlements*[4].

Les besoins en compartimentation dépendent de la dimension du bâtiment, des risques qu'il présente et de la mobilité de ses occupants, comme nous le verrons plus tard. Pour l'instant, il importe de comprendre la notion de compartimentation et d'évaluer le niveau de performance généralement exigé des parois de compartimentation (murs, planchers et toits).

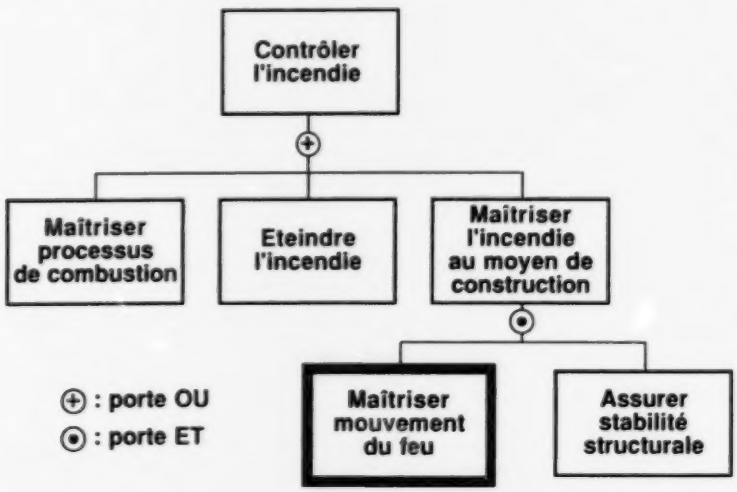
Figure 1 Évolution type d'un feu de compartiment



Définition de la compartimentation

Un compartiment résistant au feu est défini comme un espace isolé du reste du bâtiment par une construction continue. Il peut s'agir d'une seule pièce, d'une série de pièces ou d'un étage au complet, ou encore d'un vide technique horizontal ou vertical. Si nous pouvions isoler chaque pièce ou chaque vide technique de cette façon, nous obtiendrions un niveau très élevé de sécurité incendie. Cependant, cela représente une solution très coûteuse qui n'est pas nécessairement très pratique et rentable, du strict point de vue de la sécurité des personnes. Une méthode plus rationnelle consiste à déterminer l'emplacement des compartiments résistant au feu d'un point de vue stratégique, en tenant compte des objectifs en matière de sécurité des personnes et de protection des biens.

Figure 2 Élément "maîtriser mouvement du feu", subdivision "contrôler l'incendie" de l'arbre de sécurité incendie



Est-il pratique d'isoler chaque espace à l'aide de barrières continues? Nous savons que des ouvertures sont nécessaires pour faciliter l'accès à une pièce de même que l'évacuation, et pour l'installation des équipements mécaniques et électriques et de la plomberie. Afin d'assurer l'intégrité du compartiment résistant au feu, il est très important que chaque ouverture ou pénétration pratiquée dans le mur, le plancher ou le plafond soit protégée par un dispositif empêchant la propagation de l'incendie, qu'il s'agisse de grandes ouvertures comme les embrasures de portes ou de trous moins grands pour le passage des fils et des canalisations.

Il importe, à la lumière des données statistiques sur les pertes par le feu, d'évaluer les conséquences possibles d'une protection insuffisante des pénétrations. Le feu se propage rarement d'une pièce à une autre en détruisant ou brûlant à travers un mur ou un plancher. Il contourne habituellement ces obstacles par des voies dissimulées dans les murs ou les plafonds; conduits d'installations de chauffage, ventilation et conditionnement d'air; trous de trop grandes dimensions pratiqués dans les murs de maçonnerie pour le passage des fils électriques ou autres; portes ouvertes ou maintenues ouvertes à l'aide de cales. Chacune de ces ouvertures doit être dotée d'un dispositif assurant que l'incendie sera circonscrit à l'endroit où il a pris naissance.

Une séparation coupe-feu est un ensemble continu dans lequel chaque ouverture ou vide est protégé par un dispositif d'obturation (un mécanisme spécial destiné à fermer une ouverture, comme une porte, du verre armé ou des volets) ou par des matériaux coupe-feu résistant au feu. Les séparations coupe-feu, ainsi que les mécanismes et dispositifs destinés à fermer les ouvertures dans la séparation coupe-feu, doivent normalement posséder un certain degré de résistance au feu, c'est-à-dire qu'elles doivent être en mesure de résister aux effets du feu et d'empêcher sa propagation durant une période de temps déterminée. Des essais à échelle réduite et pleine grandeur ont été mis au point afin d'évaluer la capacité de certains éléments et ensembles de construction à jouer ce rôle; ces essais seront décrits plus loin.

Il serait bon de signaler que les codes du bâtiment n'exigent pas que toutes les séparations coupe-feu possèdent un degré de résistance au feu. Par exemple, les planchers incombustibles de certains bâtiments de petites dimensions n'ont pas besoin d'être protégés ou d'avoir un degré de résistance au feu. Ils sont censés posséder une résistance au feu intrinsèque qui, bien que non mesurée, est considérée comme suffisante pour assurer la sécurité des occupants dans l'hypothèse où l'évacuation complète du bâtiment n'exige que quelques minutes (cinq minutes ou moins). En d'autres mots, la sécurité des personnes dans les petits bâtiments peut être assurée sans que les planchers ne soient dotés d'un degré de résistance au feu additionnel. (Le propriétaire du bâtiment peut décider d'augmenter le degré de résistance au feu des planchers afin de minimiser les dommages matériels et de réduire les coûts d'assurances. Selon les dimensions et l'usage du bâtiment, une telle protection additionnelle peut n'être justifiable que d'un point de vue économique.)

Le temps requis pour l'évacuation complète d'un bâtiment varie selon le nombre d'étages et le type d'utilisation du bâtiment. Par exemple, il faut beaucoup plus de temps pour évacuer un établissement hospitalier dont les patients sont partiellement ou totalement handicapés qu'un édifice à bureaux de mêmes dimensions. Par contre, l'évacuation d'un bâtiment en hauteur peut nécessiter plus de deux heures selon sa hauteur et le nombre d'occupants[5]. Les temps d'évacuation indiqués au tableau 1 montrent clairement qu'il faut beaucoup plus de temps pour évacuer un édifice à bureaux à forte densité qu'un immeuble d'habitation; cela s'explique par la congestion dans les escaliers

Tableau 1 Temps requis pour l'évacuation complète d'un bâtiment

Hauteur du bâtiment (étages)	Temps d'évacuation (min)	
	Bureaux	Habitations
5	6-12	3-6
15	18-36	9-18
20	24-48	12-24
30	36-72	18-36
40	48-96	24-48
50	60-120	30-60

d'issue. On pourrait concevoir des escaliers plus larges mais, sauf pour les bâtiments de petites dimensions, cela représenterait une solution coûteuse.

Si les escaliers sont conçus pour faciliter l'évacuation des occupants d'un seul étage à la fois, les occupants des étages situés au-dessus de

celui où l'incendie a pris naissance auront besoin d'une protection contre la propagation du feu durant une période de temps plus longue que celle fournie par une construction traditionnelle sans degré de résistance au feu (entre dix et vingt minutes). Une compartimentation d'étage à étage est habituellement la meilleure façon d'assurer cette protection; tous les ensembles planchers-plafonds sont construits d'une manière à servir de séparations coupe-feu, comme l'illustre la figure 3.

Le niveau ou la durée nécessaire de la résistance contre les effets du feu varie en fonction des bâtiments. Dans une construction de faible hauteur, les séparations coupe-feu doivent retarder la progression verticale de l'incendie suffisamment longtemps pour permettre l'évacuation complète des étages supérieurs. Selon les codes du bâtiment, de 45 à 60 minutes suffisent à cette fin. Dans les bâtiments en hauteur, les séparations coupe-feu des planchers doivent résister pour toute la durée d'un incendie, c'est-à-dire le temps qu'il faut pour que toute matière combustible sur un plancher (objets mobiliers) brûle entièrement ou que les sapeurs-pompiers maîtrisent l'incendie, puisque le temps requis pour évacuer complètement le bâtiment peut être supérieur à la durée de l'incendie. Le Code national du bâtiment[4] stipule qu'une résistance au feu de deux heures constitue une protection adéquate dans ce type de bâtiments.

Évaluation de la performance des séparations coupe-feu

À la fin des années 1800, les règlements de la construction étaient surtout constitués d'exigences longues et complexes contenant des spécifications relatives aux divers types de matériaux et aux méthodes d'assemblage jugées aptes à offrir un niveau acceptable de protection contre les incendies[6]. Ces exigences étaient basées presque entièrement sur des observations effectuées lors d'incendies, et les autorités compétentes hésitaient à permettre l'utilisation de matériaux nouveaux ou de nouvelles constructions. Par suite des pressions constantes exercées par les concepteurs et les fabricants de produits afin que des systèmes brevetés soient reconnus au même titre que les constructions traditionnelles, les agents du bâtiment et les chercheurs de Denver et de New York décidèrent de construire des fours d'essais sur des terrains vacants et de soumettre des échantillons de plancher types à des incendies de bois de chauffage d'assez longue durée (expositions variant entre 8 et 24 heures). Aussitôt que cette méthode d'évaluation reçut l'approbation à travers les États-Unis, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) mit sur pied, en 1905, un comité dont le mandat consistait à mettre au point une norme d'essai au feu appropriée.

Publiée en 1908, la norme de l'ASTM spécifiait des critères de réception d'essai qui sont demeurés relativement les mêmes jusqu'à ce jour. Ces critères, qu'on retrouve au Canada dans la norme des Laboratoires des assureurs du Canada CAN4-S101, Méthodes d'essai normalisées de résistance au feu des constructions et des matériaux[7], sont les suivants :

- aucun passage de gaz chauds ou de flammes,
- échantillon doit rester en place lorsque soumis à des surcharges,

Figure 3 Compartimentation d'étage à étage et des issues

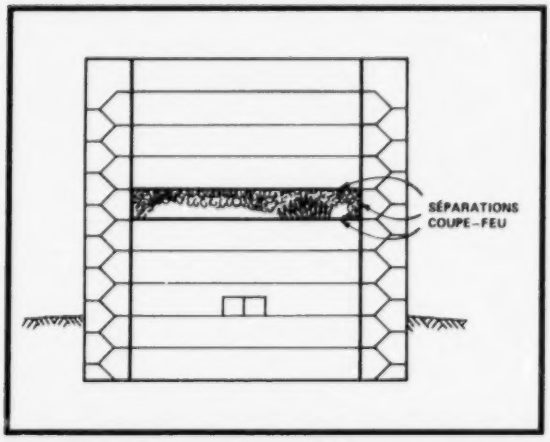
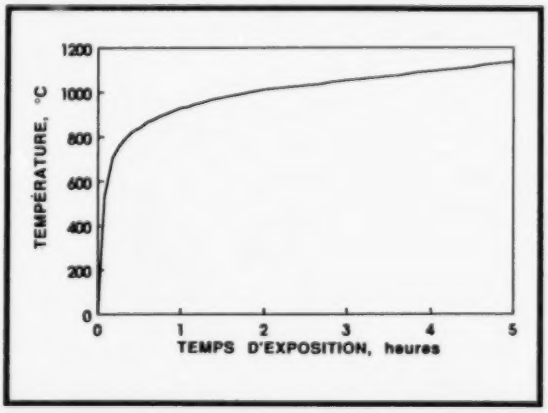


Figure 4 Courbe température-temps normalisée



- augmentation de la température sur la surface non exposée limitée à :
  139 °C (moyenne de neuf points mesurés)
  181 °C (maximum),
- aucun passage de jet de lance.

Un degré de résistance au feu d'un élément de construction tel qu'il est indiqué dans les codes fait référence au temps pendant lequel un échantillon peut résister à l'exposition au feu dans des conditions déterminées et satisfaire aux critères mentionnés précédemment. Le degré d'exposition au feu auquel sont soumis les échantillons est exprimé à l'aide de la courbe température-temps, illustrée à la figure 4. Cette courbe a été établie en 1918 en tenant compte des températures maximales lors d'incendies réels, observées en utilisant comme référence les points de fusion connus de matériaux.

Les deux premiers critères servant à définir le degré de résistance au feu ne nécessitent aucune explication. Le critère d'augmentation de la température a été ajouté en 1918 pour limiter la transmission de chaleur à travers l'ensemble, ce qui risquerait autrement d'enflammer les matériaux combustibles stockés directement sur le plancher ou contre le mur non exposé dans le compartiment adjacent. La limite d'augmentation de température a d'abord été établie à 167 °C en tenant compte de la température d'inflammation de résidus de coton; elle a été plus tard réduite à 139 °C après que l'on eut observé que la température de l'autre côté des murs continuait d'augmenter pendant un certain temps après que le four d'essai était éteint. Le dernier critère assure une résistance minimale aux effets de l'érosion produite par un jet de lance qui pourrait être dirigé contre le mur durant les opérations d'extinction.

Puisqu'il est également nécessaire de protéger les voies d'accès et les ouvertures techniques présentes dans les portes et les murs, d'autres méthodes d'essai ayant recours au même type d'exposition au feu ont été mises au point pour les éléments de construction qui agissent comme dispositifs d'obturation. Par exemple, la norme CAN4-S104[8] traite du comportement au feu des portes, la norme CAN4-S106[9] porte sur le comportement au feu des fenêtres et des briques de verre, et la norme CAN4-S112[10], sur le comportement au feu des registres coupe-feu utilisés dans les conduits des installations de chauffage, ventilation et conditionnement d'air au point où ceux-ci pénètrent une séparation coupe-feu. De plus, une nouvelle norme des Laboratoires des assureurs du Canada, CAN4-S115, Méthode normalisée d'essai de comportement au feu des ensembles coupe-feu[11], sera bientôt incluse dans le CNB pour évaluer la performance des dispositifs utilisés pour maintenir l'intégrité des séparations coupe-feu en présence de pénétrations techniques.

Il importe de souligner un point important concernant les dispositifs d'obturation et les ensembles coupe-feu. Leur degré de résistance au feu n'est pas aussi élevé que celui des séparations coupe-feu dont ils font partie. Par exemple, les dispositifs d'obturation ont un degré pare-flammes qui est non seulement de plus courte durée que le degré de résistance au feu du plancher ou du mur (tableau 2), mais il est également établi sans tenir compte du critère de transmission de chaleur relatif aux séparations coupe-feu. Cela a été permis principalement pour deux raisons : premièrement, certains sont d'avis que puisqu'une ouverture se trouve là pour permettre l'accès à une pièce ou le passage des canalisations de service, il y a peu de risques que des matières combustibles soient stockées directement contre la paroi de part et d'autre de l'ouverture. Deuxièmement, les dispositifs d'obturation sont généralement de petites dimensions et l'on tient pour acquis que les sapeurs-pompiers sont en mesure de maîtriser de petits incendies localisés de l'autre côté d'une séparation coupe-feu.

Tableau 2 Degré pare-flammes des dispositifs d'obturation dans les séparations coupe-feu*

Degré de résistance au feu de la séparation coupe-feu, en h	Degré pare-flammes exigé pour les dispositifs d'obturation, en h
0	0
0,75	0,75
1	0,75
1,5	1
2	1,5
3	2
4	3

* Tableau 3.1.6.A., Code national du bâtiment du Canada[2]

Disponibilité des résultats d'essais de résistance au feu

Depuis le début des années 20, un nombre considérable d'essais de résistance au feu ont été

réalisés dans des laboratoires en Amérique du Nord, produisant une multitude de données sur les propriétés de résistance au feu des matériaux et des ensembles. Les concepteurs peuvent obtenir ces données en consultant les répertoires de systèmes brevetés soumis à des essais par des organismes comme :

- les Laboratoires des assureurs du Canada[12]
- les Services professionnelsWarnock Hersey Ltée[13]
- Underwriters' Laboratories Incorporated[14]
- Factory Mutual Research Corporation[15].

De plus, lorsque la résistance au feu d'un ensemble dépend strictement de la spécification ou de la disposition de matériaux pour lesquels des normes reconnues à l'échelle nationale existent, des degrés de résistance au feu génériques ont été établis par le Comité associé du Code national du bâtiment en tenant compte de résultats d'essais. Ces degrés sont publiés au chapitre 2 du Supplément du CNB 1985[16].

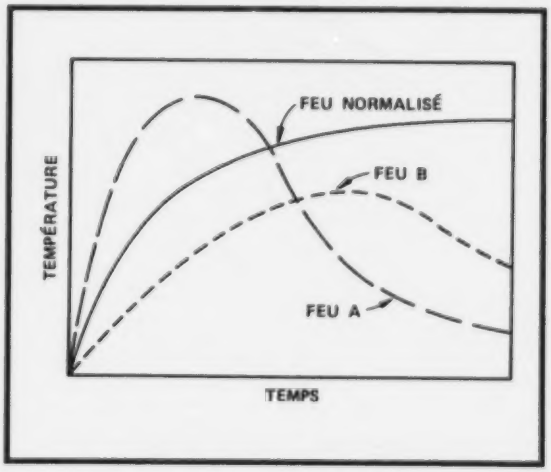
Le Supplément contient des degrés de résistance au feu pour une multitude d'ensembles comme les planchers, les murs et les poteaux en béton armé, les murs de maçonnerie de béton, les constructions avec ossature de bois ou d'acier, les poteaux d'acier protégés, ainsi que les poteaux et poutres en bois lamellé collé. Puisque ces degrés sont censés s'appliquer à tous les systèmes et produits regroupés sous les descriptions de matériaux types dans les normes, les valeurs attribuées sont généralement inférieures à celles obtenues lors des essais. Cependant, pour qu'une valeur indiquée dans le Supplément soit accordée à un ensemble, toutes les dispositions et conditions du chapitre 2 applicables doivent être respectées. Des modifications ne sont pas permises à moins qu'il ne soit démontré, à l'aide d'essais ou d'évaluations faites par des ingénieurs, que ces modifications n'auront aucun impact négatif sur la résistance au feu de l'ensemble.

Règle générale, la prolifération de résultats d'essais d'ensembles de construction a eu un impact à sens mixte pour les concepteurs. Ils ont sûrement permis de réaliser des économies substantielles dans le domaine de la construction en dispensant d'essais coûteux chaque fois qu'un nouveau projet est à l'étude. Cependant, ils ont sévèrement mis un frein aux innovations en incitant les ingénieurs à recourir à des ensembles déjà soumis à des essais plutôt que de mettre au point de nouveaux systèmes. Il n'est pas rare que des concepteurs (architectes ou ingénieurs) se contentent de respecter les exigences de résistance au feu en s'assurant simplement que leur système soit inclus dans le chapitre 2 du Supplément du CNB ou dans les répertoires de systèmes brevetés. D'importantes réalisations sont à notre portée grâce aux progrès récents non seulement dans la quantification de la sévérité probable d'un incendie, mais également de ses effets sur la performance de la structure. Des méthodes analytiques présentement mises au point dans les établissements de recherche à travers le monde permettront de calculer ou de prédire la résistance au feu des éléments et des ensembles de construction. Ces méthodes sont examinées en détail dans l'exposé intitulé *Protection des structures contre l'incendie – Méthodes de prédiction*[17].

Limites de l'essai de résistance au feu

L'essai normalisé de résistance au feu est souvent l'objet de critiques parce qu'il ne serait pas représentatif des incendies réels, qui peuvent être plus ou moins violents selon la quantité, le type et la forme de la charge combustible (éléments qui peuvent brûler) présente dans le compartiment, l'apport d'air frais (portes et fenêtres) et les propriétés thermiques des matériaux de revêtement intérieur de finition (figure 5). Cependant, l'essai de chaque assemblage selon les diverses possibilités de feu n'est pas une solution qui présente des avantages économiques. Ce problème a été soulevé lors de l'introduction de l'essai normalisé d'exposition à la chaleur et, en 1928, des efforts ont été déployés par S.H. Ingberg, ingénieur du U.S. National Bureau of Standards, afin d'établir une

Figure 5 Comparaison de feux de compartiment types (A et B) et d'une exposition à un feu normalisé



relation entre l'essai au feu normalisé et les incendies réels[18].

Ingberg a procédé à une série d'essais au feu en salle pleine grandeur avec des charges combustibles représentatives de ceux qu'on retrouve dans les bureaux, dans les salles d'archives et dans les habitations. À la suite de ces essais, durant lesquels les températures de la pièce ont été enregistrées en fonction du temps, Ingberg a élaboré l'hypothèse de la surface égale pour comparer la sévérité d'un incendie réel à celle d'un incendie normalisé de durée spécifique. L'hypothèse, illustrée à la figure 6, suppose essentiellement que la sévérité d'un incendie réel et celle de feux d'essai peuvent être considérées comme semblables si les surfaces de leurs courbes température-temps au-dessus d'un niveau de base sont égales.

Bien qu'elle se soit révélée depuis scientifiquement inexacte[19], la relation empirique de Ingberg entre la charge combustible et la durée équivalente de l'exposition au feu normalisée constitua une méthode pratique d'évaluation des niveaux de résistance au feu permettant à un compartiment de résister à la combustion complète de la charge combustible présente (tableau 3). Le concept fut donc adopté par les autorités compétentes dans les années 30 et 40 à la suite de collectes de données sur les charges combustibles dans les habitations, les bureaux, les écoles, les hôpitaux, les magasins et les établissements industriels[20].

Cependant, les responsables des codes ont vu que les données relatives à la charge combustible n'étaient qu'un des éléments de l'équation en matière de sécurité incendie. D'autres facteurs comme la hauteur et l'aire des bâtiments, la capacité des occupants à évacuer rapidement et sans aide, le niveau de conscience de la menace d'un incendie (personne éveillée ou endormie), ainsi que les moyens de lutte contre l'incendie, ont également un effet au niveau de la sécurité des personnes, et ils ont influencé les décisions relatives au niveau de résistance au feu jugé nécessaire dans divers types de bâtiments.

Figure 6 Hypothèse d'Ingberg – sévérité de l'incendie égale si surface A = surface B

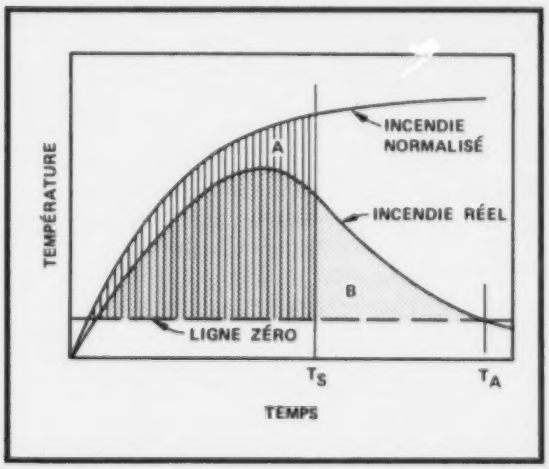


Tableau 3 Relation entre la charge combustible et la sévérité de l'incendie[18]

Contenu combustible*		Durée de l'exposition au feu normalisée
(lb/pi²)	(kg/m²)	(heures)
5	24,4	0,5
7,5	36,6	0,75
10	48,8	1
15	73,2	1,5
20	97,6	2
30	146,5	3
40	195,3	4,5
50	244,1	6
60	292,9	7,5

* Exprimé en fonction du poids équivalent de bois (compte tenu de la valeur calorifique) par unité de surface de plancher.

La compartimentation dans le CNB

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le Code national du bâtiment a recours à la compartimentation pour réaliser l'un des objectifs suivants : *circonscrire* un incendie dans les limites d'un compartiment, et par conséquent protéger les occupants du reste du bâtiment; ou *isoler* les occupants à l'intérieur d'un compartiment (ou aire de refuge) des espaces adjacents qui pourraient être envahis par la fumée ou être la proie des flammes. L'exigence voulant que les établissements industriels à risques élevés (groupe F, division 1) soient séparés du reste du bâtiment, ou que les locaux techniques, les vide-ordures et les chambres de transformateur soient isolés par des séparations coupe-feu ayant un degré de résistance au feu d'une, deux ou trois heures selon le risque en cause sont des exemples de compartimentation.

La compartimentation s'applique en outre aux issues (y compris les escaliers de secours), qui doivent être isolées du reste du bâtiment par une séparation coupe-feu (comme l'indique la

figure 3). Dans un hôpital, les salles d'opération ou de soins intensifs doivent être isolées des espaces contigus par des séparations coupe-feu afin d'éviter que les patients soient évacués à la hâte en cas d'incendie dans une salle adjacente.

Il serait bon de souligner que, lorsqu'on a recours à l'isolement, on vise à protéger les occupants d'un compartiment contre une menace possible, et non le contraire (circonscrire le danger à son lieu d'origine). Cette précision est importante lorsqu'on étudie d'autres moyens de satisfaire à l'objectif d'une exigence. Par exemple, l'installation d'extincteurs automatiques à eau à l'intérieur d'un compartiment résistant au feu peut sauver des vies ou protéger des biens lorsque l'objectif de la compartimentation est de circonscrire l'incendie, car le réseau d'extincteurs automatiques agit directement dans le but de contrer le risque d'incendie identifié. Le même réseau n'offrirait qu'une faible protection si le compartiment était conçu pour isoler les occupants; un incendie faisant rage à l'extérieur du compartiment pourrait annuler l'action du réseau d'extincteurs à l'intérieur du compartiment au moment où les flammes traverseraient la séparation coupe-feu.

Le tableau 4 énumère sept applications du concept de compartimentation dans le CNB. Les objectifs de l'exigence sont indiqués pour chaque application. On recommande au lecteur d'examiner chaque objectif et l'exigence correspondante en termes de circonscription ou d'isolement.

Mise au point de solutions équivalentes

La compréhension totale du but d'une exigence constitue la plus importante étape dans le processus d'élaboration d'une solution équivalente. Les équivalents aux exigences des codes sont permis en vertu de la section 2.5 du CNB, à condition qu'il soit démontré que l'équivalent proposé offre le même niveau de sécurité que la solution du code.

Le but d'une exigence comporte deux éléments : un objectif de sécurité incendie et un niveau de performance que doit fournir la solution ou la mesure utilisée pour réaliser l'objectif. La connaissance de l'objectif de sécurité incendie d'une exigence particulière constitue la première condition pour élaborer des équivalents, mais ces objectifs sont rarement définis de manière explicite dans le code du bâtiment. Le Commentaire sur la partie 3 du CNB[21] est un document explicatif qui aide à élucider certains objectifs du code. Cependant, une analyse détaillée de l'application d'un concept de protection contre l'incendie (par exemple celui qui est présenté dans cet exposé) est parfois la seule façon d'identifier les problèmes relatifs à la protection contre l'incendie sous-jacents à une exigence particulière. Par exemple, le tableau 4 constitue une tentative en vue d'éclaircir les objectifs en matière de sécurité incendie des exigences du CNB relatives aux séparations coupe-feu et à la compartimentation.

Une fois que l'objectif a été clairement identifié, des solutions de rechange peuvent être mises au point afin de limiter le risque d'incendie. Le concepteur doit être prêt à produire des documents (y compris des calculs, des données statistiques, etc.) attestant que la solution proposée est aussi efficace et fiable que la solution du code.

Par exemple, un équivalent possible serait de trouver une autre façon de réglementer les substances dangereuses normalement entreposées dans les resserres de concierge. Le code exige que de tels resserres soient séparées du reste du bâtiment et dotées d'au moins un détecteur de chaleur pour avertir les occupants du bâtiment en cas d'incendie dans l'un de ces locaux. L'objectif de cette exigence relative aux séparations coupe-feu est de circonscrire l'incendie suffisamment longtemps pour permettre l'évacuation des occupants de l'étage en toute sécurité. Puisque seul un détecteur de chaleur est requis pour détecter l'incendie, la solution du code sous-entend la nécessité d'un certain délai. L'utilisation d'un système de détection plus rapide (et aussi fiable) assurerait un début d'évacuation plus hâtif. Il peut être possible de démontrer que le temps de détection serait suffisamment réduit pour permettre l'évacuation complète de l'aire de plancher avant que l'incendie n'ait eu le temps de se propager à l'extérieur de la resserre, même si la séparation coupe-feu n'a pas de degré de résistance au feu.

Un autre exemple serait celui d'un concepteur qui proposerait l'utilisation d'un réseau d'extincteurs automatiques à eau conçu de manière à maîtriser un risque à l'intérieur d'un compartiment devant être isolé du reste du bâtiment par une construction ayant un degré de résistance au feu. Le concepteur peut être capable de démontrer que le réseau d'extincteurs automatiques sera en mesure de contrer efficacement le risque d'incendie identifié (c'est-à-dire

Tableau 4 Principales exigences relatives à la compartimentation dans le Code national du bâtiment

Article	Exigence	Objectif(s)
3.1.3.1.	Séparation des usages principaux	(1) protéger les occupants des établissements de réunion, hospitaliers, d'assistance ou de détention contre les risques adjacents (2) circonscrire les risques d'incendie dans les établissements industriels et commerciaux
3.4.4.1	Séparation des issues	(1) protéger les personnes en train d'évacuer contre les risques d'incendie sur les étages adjacents (2) assurer aux sapeurs-pompiers l'accès en sécurité à l'incendie
3.3.2.X.	Séparation des étages	(1) permettre aux occupants au-dessus de l'étage de l'incendie d'atteindre une zone de refuge (2) limiter l'ampleur de l'incendie (éviter un grand sinistre)
3.2.6.6. 3.3.3.5.	Zones séparées sur une aire de plancher	(1) limiter l'ampleur de l'incendie lorsque le compartiment résistant au feu est trop grand et l'extinction difficile (3.2.6.6.) (2) accroître le temps dont dispose les occupants pour évacuer l'étage en feu lorsque l'évacuation verticale est difficile (3.3.3.5.)
3.2.6.2. 3.2.8.4. 3.3.3.8.	Zones de refuge séparées	(1) prévoir des zones sans danger lorsque : (a) cette option relative à la limitation de la fumée dans les bâtiments de grande hauteur est utilisée (3.2.6.2) (b) la séparation des étages est incomplète et la capacité d'évacuation des issues inadéquate (3.2.3.4.) (c) l'évacuation est impraticable (3.3.3.8)
3.3.1.1.	Séparation des suites	(1) accorder aux occupants des suites adjacentes plus de temps pour prendre conscience de l'incendie et évacuer
3.5.2.X. 3.5.3.X.	Séparation des locaux dangereux	(1) circonscrire les dangers créés par : (a) les installations techniques (3.5.2.X.) (b) les locaux techniques continus (3.5.3.X.)

diminuer l'exposition au feu) et de justifier une diminution du degré de résistance au feu exigé pour la séparation coupe-feu.

Dans tous les cas, il est important de procéder à un examen judicieux de la situation en indiquant a) que les dangers ont été correctement identifiés, b) qu'ils ont été évalués en fonction de leurs risques respectifs, et c) que la solution proposée a comme objectif de contrer adéquatement ces dangers (à un niveau équivalant au moins à la solution du code).

Conclusion

Les codes du bâtiment contiennent de nombreuses exigences en matière de séparations coupe-feu qui font appel à la compartimentation du bâtiment de manière à former de petites cellules plus facilement contrôlées du point de vue de la sécurité incendie. La compartimentation est utilisée pour circonscrire un incendie ou isoler les occupants à l'intérieur d'une aire de refuge afin d'obtenir un niveau uniforme de sécurité dans les bâtiments.

Pour que ce concept soit efficace, les parois du compartiment doivent posséder un niveau adéquat de résistance au feu qui variera en fonction des circonstances, de la dimension du bâtiment et du type d'usage. De plus, chaque ouverture ou pénétration dans la séparation coupe-feu doit être protégée convenablement par un dispositif d'obturation ou un dispositif coupe-feu ayant un degré pare-flammes.

Une compréhension totale de l'objectif spécifique de chaque exigence relative aux séparations coupe-feu devrait permettre à des concepteurs doués d'imaginer des façons équivalentes de satisfaire non seulement à l'objectif minimum du code en matière de sécurité des personnes, mais d'assurer également la protection optimale des biens imposée par le côté économique de la situation.

Références

1. Mehaffey, J.R., 1987. *Inflammabilité des matériaux de construction et développement du feu*, Compte rendu du Regard 87 sur la science du bâtiment, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, CNRC 28277F, pp. 25-39.

2. Code national du bâtiment du Canada 1985. Comité associé du Code national du bâtiment, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, CNRC 23174F, 487 p.

3. Côté, A.E., et J.L. Linville (dir. de publ.), 1986. Fire Protection Handbook, 16e édition, Systems Concepts for Building Firesafety, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 7-10 à7-19.

4. Richardson, J.K., 1987. *Sécurité incendie, données statistiques et règlements*, Compte rendu du Regard 87 sur la science du bâtiment, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 28277F, pp. 1-9.

5. Galbreath, M., 1969. *Time of evacuation by stairs in high buildings*. Fire Fighting in Canada, vol. 13, n° 1, pp. 6-10.

6. Shoub, H., 1961. *Early history of fire endurance testing in the United States*, Fire Test Methods, American Society for Testing and Materials, STP 301, Philadelphie, PA, pp. 1-9.

7. Méthodes d'essai normalisées de résistance au feu des constructions et des matériaux, 1982. Laboratoires des assureurs du Canada, Norme ULC CAN4-S101, Scarborough, Ontario, 41 p.

8. Méthode normalisée des essais de comportement au feu des portes, 1980. Laboratoires des assureurs du Canada, Norme ULC CAN4-S104, Scarborough, Ontario 14 p.

9. Méthode normalisée des essais de comportement au feu des fenêtres et des briques de verre, 1980. Laboratoires des assureurs du Canada, Norme ULC CAN4-S106, Scarborough, Ontario, 8 p.

10. Méthode normalisée d'essai de comportement au feu des registres coupe-feu, 1982. Laboratoires des assureurs du Canada, Norme ULC CAN4-S112, Scarborough, Ontario 16 p.

11. Méthode normalisée d'essai de comportement au feu des ensembles coupe-feu, 1985. Laboratoires des assureurs du Canada, Norme ULC CAN4-S115, Scarborough, Ontario, 19 p.

12. List of Equipment and Materials, 1986. Volume II Building Construction, Laboratoires des assureurs du Canada, Scarborough, Ontario, 709 p.

13. Fire Laboratories Listings, 1986. Services professionnels Warnock Hersey Ltée, Coquitlam, C.-B., 339 p.

14. Fire Resistance Directory, 1987. Underwriters' Laboratories Incorporated, Northbrook, Illinois, 750 p.

15. Approval Guide 1985. Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, 535 p.

16. Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1985. Comité associé du Code national du bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa, CNRC 23178F, 290 p.

17. Gosselin, G.C., 1987. *Protection des structures contre le feu – Méthodes de prédiction,* Compte rendu du Regard 87 sur la science du bâtiment, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 28277F, pp. 53-71.

18. Ingberg, S.H., 1928. *Test of the severity of building fires*, NFPA Quarterly, vol. 22, n° 1, pp. 43-61.

19. Harmathy, T.Z., et T.T. Lie, 1970. *Fire test standard in the light of fire research*, American Society for Testing and Materials, STP 464, Philadelphie, PA, pp. 85-97.

20. Ingberg, S.H., J.W. Dunham,et J.P. Thompson, 1947. *Combustible contents in buildings*, Building Materials and Structures Report BMS 149, National Bureau of Standards, Washington, DC.

21. Commentaire sur la partie 3 (usage des bâtiments) du Code national du bâtiment du Canada 1985. Comité associé du Code national du bâtiment du Canada, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa; paraîtra en 1988.

Protection des structures contre le feu –Méthodes de prédiction

Guy C. Gosselin, M.Sc., M.B.A., ing.

Introduction

Comme le titre "Protection des structures contre le feu" le laisse entendre, le présent document porte sur la conception de la structure du bâtiment de manière à éviter l'effondrement prématuré de ses principaux éléments porteurs en cas d'incendie. Les principaux aspects qui y sont analysés sont les objectifs de sécurité incendie qui peuvent être atteints en assurant la protection de la structure, une nette compréhension du niveau de protection nécessaire pour atteindre ces objectifs, et les moyens disponibles pour vérifier qu'une conception proposée fournit le degré nécessaire de résistance au feu.

Le présent document analyse également les fondements des exigences de protection de la structure contre le feu contenues dans l'édition en vigueur du Code national du bâtiment ainsi que les dispositions particulières aux séparations coupe-feu majeures qui sont utilisées pour subdiviser les grands bâtiments.

Objectifs de la sécurité incendie

Il ne fait aucun doute que l'une des principales motivations qui ont mené à la recherche d'éléments structuraux plus résistants au feu réside dans les pertes matérielles inacceptables découlant de l'effondrement des bâtiments sinistrés[1-4]. Bien qu'il soit reconnu que les dispositions des codes produits par les gouvernements ne peuvent "réglementer la construction, sauf pour ce qui touche la santé, la sécurité et le bien-être des occupants et des passants aux environs des bâtiments" et ne peuvent donc pas "exiger juridiquement la conformité aux règles de l'art pour des raisons purement économiques, bien que celà soit souhaitable", des exigences minimales visant à empêcher l'effondrement ont été jugées justifiables sur le plan juridique, ne serait-ce que pour protéger l'investissement des propriétaires des bâtiments voisins[1]. Cette notion a pris de la popularité au tout début du 20e siècle, lorsque les premiers "gratte-ciels" sont apparus. Il va de soi que l'idée de voir un édifice de 50 étages s'effondrer sur les propriétés et les rues voisines ne plaisait guère au grand public, qui a exigé que des mesures soient instaurées pour s'assurer que l'ossature des bâtiments de grande hauteur demeure en place après un incendie.

La protection de la propriété a donc joué un rôle important dans l'établissement des premières exigences de protection de la structure contre le feu. Toutefois, au fil des ans, certains assouplissements quant au degré de résistance au feu ont été justifiés par la confiance acquise grâce aux essais d'ensembles de construction de vraie grandeur, aux travaux expérimentaux effectués par le National Bureau of Standards[5] sur l'intensité et la durée prévues des incendies dans les bâtiments et grâce à l'expérience acquise lors de vrais incendies. Dès lors, la sécurité des pompiers et des occupants est devenu le principal objectif des exigences minimales des codes. Mais pourquoi croit-on que ces personnes sont en danger? Les exigences d'inflammabilité et de compartimentation du code (décrites dans d'autres documents du Regard 87[6,7]) ne sont-elles pas suffisantes? La réponse à ces questions est qu'une séparation coupe-feu ou une barrière contre la propagation du feu ne peut pas être

plus efficace que l'ensemble structural qui la supporte. Il serait insensé de permettre qu'un plancher ayant un degré de résistance au feu de deux heures soit soutenu par des poutres et poteaux non protégés qui pourraient s'effondrer en aussi peu que dix ou vingt minutes après l'embrasement général dans le compartiment directement au-dessous du plancher.

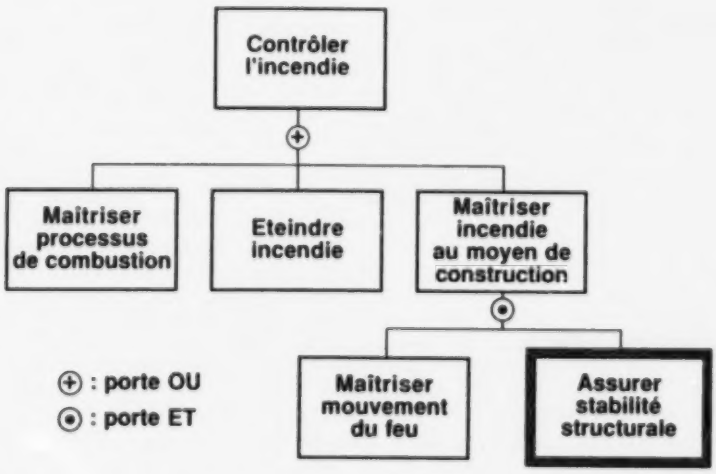
L'arbre des concepts de sécurité incendie élaboré par la NFPA[6] tient compte du fait que l'objectif ou la subdivision "maîtriser l'incendie au moyen de construction" ne peut être atteint que si le feu ne peut se propager (grâce aux barrières telles que les séparations coupe-feu) et si la stabilité structurale est assurée. La nécessité de ces deux conditions est illustrée à la figure 1 par la porte ET au-dessus de ces deux éléments de l'arbre. L'un des principaux objectifs de sécurité de la protection incendie des structures consiste donc à s'assurer que les séparations coupe-feu exigées puissent remplir leur fonction de barrière pendant la durée prévue. Par conséquent, tous les facteurs qui jouent un rôle dans l'évaluation du degré de résistance au feu considéré nécessaire pour la séparation coupe-feu (la mobilité relative et la conscience de l'incendie des occupants, les charges combustibles prévues, les risques inhérents à l'usage, etc.) s'appliquent également à la détermination du degré de résistance des éléments structuraux porteurs. Ces facteurs sont analysés en détail dans le document *Compartimentation et résistance au feu*[7].

Le rôle de la protection des structures contre le feu peut se résumer à un ou à plusieurs des objectifs de sécurité incendie suivants :

- laisser aux occupants des étages au-dessus de l'étage en feu un temps *suffisant* pour atteindre un endroit sûr;
- soutenir les séparations coupe-feu nécessaires pour limiter l'ampleur du feu et éviter ainsi la conflagration;
- réduire au minimum les risques de dommages aux propriétés voisines.

Le mot "suffisant" est mis en évidence dans le premier objectif pour indiquer que le niveau de tenue exigé (degré de résistance au feu) variera en fonction des conditions de conception. Grâce aux technologies actuelles, l'effondrement d'un élément soumis à un foyer en pleine combustion peut être retardé de quelques minutes, de quelques heures ou indéfiniment. Il n'est pas toujours nécessaire de retarder l'effondrement indéfiniment (c.-à-d. de l'empêcher). Par exemple, il est possible que les petits bâtiments desquels les occupants peuvent évacuer rapidement en cas d'incendie ne nécessitent pas de précaution particulière contre l'effondrement et que leur conception satisfasse tout de même à l'objectif de sécurité des personnes. Dans ces cas-ci, le choix de prévoir ou non une protection pour la structure et la détermination du degré de protection à assurer pour le bâtiment dépendent strictement de la situation économique (c.-à-d. il faut comparer la valeur des

Figure 1 Élément "assurer stabilité structurale" de la subdivision "s'occuper du feu" de l'arbre de sécurité incendie



immobilisations et du matériel avec le coût des mesures de protection de la structure contre le feu).

Dans les bâtiments plus grands, ou ceux où les occupants peuvent avoir de la difficulté à évacuer, le temps nécessaire pour une évacuation complète sera plus long. De plus, les sapeurs-pompiers devront entrer dans le bâtiment, aider à l'évacuation et tenter d'éteindre le feu. Afin d'assurer la sécurité des occupants et des pompiers, il faut retarder l'effondrement en prévoyant un niveau plus élevé de protection de la structure. Toutefois, il peut tout de même être acceptable, sur le plan économique, de subir la perte financière découlant de la destruction et de l'effondrement du bâtiment, une fois que tout le monde est en lieu sûr. Là encore, le niveau de protection à prévoir au-delà du niveau minimal nécessaire pour atteindre l'objectif de sécurité des personnes dépendra de l'aspect économique de la question.

Lorsque la hauteur ou l'usage du bâtiment est tel que l'évacuation complète est impossible, l'effondrement des principaux éléments structuraux doit être empêché pendant toute l'alerte incendie et au-delà. Bien que cela nécessite un niveau de protection qui réduira du même coup les pertes matérielles, il n'est pas garanti que les dommages subis par la structure seront réparables. Encore une fois, le propriétaire, l'assureur et le concepteur devront discuter de la rentabilité de prévoir un niveau de protection de la structure contre le feu qui assurerait que le bâtiment peut être rapidement rénové après un incendie.

Exigences des codes du bâtiment

Les exigences contenues dans les codes du bâtiment tels que le Code national du bâtiment (CNB)[9] constituent les normes minimales de sécurité incendie jugées acceptables par la société. Elles visent principalement la protection des personnes et non celle des biens.

Les codes exigent généralement que les éléments et ensembles porteurs (murs, poteaux et arcs) aient un degré de résistance au feu au moins égal à celui exigé pour l'ensemble supporté (plancher ou toit), pour les raisons expliquées précédemment. En général, le CNB n'impose pas de niveau minimal de protection de la structure contre le feu pour les logements unifamiliaux et bifamiliaux, puisqu'on prévoit que les occupants pourront évacuer les lieux avant qu'un élément structural s'effondre. Dans les bâtiments d'au plus cinq ou six étages, où un processus d'évacuation normal est anticipé (par exemple dans la plupart des établissements de réunion, des habitations et des édifices à bureaux), un degré de résistance au feu de trois quarts d'heure ou d'une heure est généralement exigé pour permettre l'évacuation complète du bâtiment. Pour les bâtiments plus élevés, et certains autres tels que les hôpitaux, les cinémas et les établissements correctionnels, qui ne peuvent être évacués rapidement ou facilement, la protection jugée suffisante est de deux heures. Une résistance au feu de trois heures n'est exigée que pour les grands bâtiments contenant une charge combustible dangereuse (établissements commerciaux et établissements industriels à risques moyens ou à risques élevés). Les degrés de résistance exigés dépendent également de la capacité d'extinction disponible (facilité d'accès pour les corps de sapeurs-pompiers et présence ou absence d'extincteurs automatiques à eau).

Le degré de résistance au feu le plus élevé (quatre heures) exigé par le CNB s'applique aux murs coupe-feu contigus aux usages à risques élevés. Un mur coupe-feu est une solide séparation coupe-feu en maçonnerie ou en béton qui est destinée à empêcher le feu de se propager entre des bâtiments voisins. À cette fin, un mur coupe-feu doit posséder une stabilité structurale suffisante pour ne pas s'écrouler par suite de l'effondrement d'un plancher ou du toit de l'un des bâtiments qu'il sépare. Donc, si un plancher ayant une résistance au feu de deux heures est fixé à un mur coupe-feu de quatre heures ou est supporté par ce dernier, les fixations plancher-mur doivent être conçues de façon que le plancher puisse s'effondrer sans affecter la stabilité structurale du mur coupe-feu.

Résistance au feu des structures traditionnelles

On peut accroître la résistance au feu des structures en augmentant les dimensions des éléments (surdimensionnement de la structure), en entourant l'élément d'un isolant à faible inertie thermique ou en protégeant tout l'ensemble ou toute la structure d'une membrane isolante. Le type de protection convenant le mieux à un ensemble donné dépend principalement du type de matériaux utilisés dans sa construction puisque chaque matériau se comporte différemment lorsqu'exposé à des températures élevées. La présente section

contient un bref résumé des principaux paramètres de conception affectant la résistance au feu ainsi que des types de protection les plus courants pour les structures en béton, en acier et en bois.

Construction en béton

Les ensembles en béton armé et précontraint sont rarement protégés extérieurement car le béton est normalement constitué de matériaux inorganiques dont la conductivité et la capacité thermiques sont faibles (c.-à-d. que le béton est un assez bon isolant). Toutefois, le béton perd graduellement sa résistance à la compression à mesure que les températures augmentent[10] (figure 2); il faut donc s'assurer que les éléments ont été calculés avec une résistance de réserve suffisante pour supporter les charges appliquées pendant toute la durée d'exposition au feu prévue.

Il est également important de s'assurer que l'armature d'acier (noyée dans le béton) est suffisamment isolée car l'acier subit une réduction considérable de sa résistance à la traction à des températures élevées[11]. La température critique de l'acier est définie comme la température à laquelle l'acier n'a plus que 60 % de sa résistance initiale; la défaillance est alors imminente sous les pleines charges de calcul (le coefficient de sécurité est réduit à un). Pour l'acier d'armature ordinaire, la température critique est de 538 °C, tandis que pour les câbles de précontrainte, qui sont en acier à haute teneur en carbone et étiré à froid au lieu d'acier à faible teneur en carbone et laminé à chaud, la température critique est beaucoup moins élevée : 427 °C.[12] Le temps qu'il faudra pour que ces températures soient atteintes dans un élément de béton (dalle, poutre ou poteau) dépend de l'épaisseur du recouvrement de béton protégeant l'acier. Puisque le béton est un assez bon isolant, il ne faut pas un recouvrement très épais pour maintenir la température de l'armature au-dessous des seuils critiques. La figure 3 illustre le gradient de température dans une dalle de béton de 150 mm après une exposition de deux heures à un feu normalisé[12]. Il est à noter que la température du béton à 50 mm de la face exposée au feu n'est que de 340 °C, soit 33 % de la température du four (1010 °C).

Le niveau d'assujettissement (entrave) contre la dilatation thermique, que tout élément de béton éprouve à mesure que sa température augmente, et le degré de continuité aux appuis assuré par le système structural affectent également la résistance au feu[13]. En général, tous deux sont considérés bénéfiques pour les éléments de béton. L'assujettissement contre la dilatation, illustré à la figure 4a, produit des efforts de

Figure 2 Effet de la température sur la résistance à la compression du béton (tiré de Malhotra, 1956)

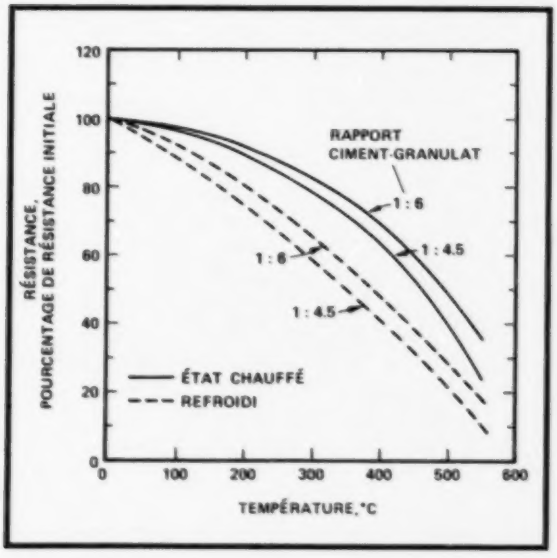
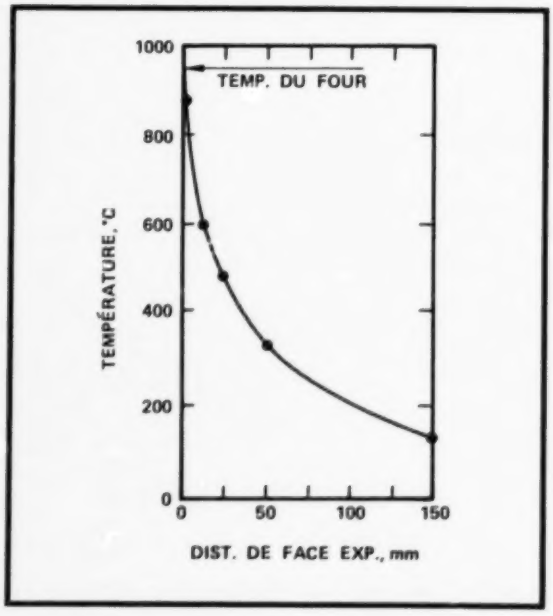


Figure 3 Gradient thermique dans un mur de béton de 150 mm d'épaisseur après une exposition de deux heures à un feu normalisé (tiré du Fire Protection Handbook, 16e édition © 1986 National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269)



compression supplémentaires qui, lorsqu'anticipé dans le calcul de la structure, réduisent les forces de traction auxquelles résiste initialement l'armature dans la moitié inférieure de l'élément. La continuité aux appuis (figure 4b) permet qu'une certaine redistribution des contraintes se produise avant qu'une rotation excessive ne survienne aux appuis et à mi-portée, causant l'effondrement de l'ensemble. Dans une structure isostatique (simplement appuyée) (figure 4a), il suffit qu'une rotation excessive survienne en un seul endroit (généralement à mi-portée) pour qu'il y ait défaillance.

Construction en acier

L'acier, comme le béton, a l'avantage d'être incombustible; mais cette seule caractéristique ne veut pas dire grand-chose lorsqu'il s'agit d'empêcher l'effondrement. Sa forte conductivité thermique fait que l'acier absorbe la chaleur beaucoup plus rapidement que d'autres matériaux; par conséquent, si l'élément structural a une masse relativement faible, sa température augmentera très rapidement. La limite élastique et le module d'élasticité de l'acier, qui sont les deux principales propriétés permettant de déterminer la capacité de charge des éléments d'acier, diminuent tous deux considérablement avec l'augmentation des températures (figure 5)[13]. À une température de 593 °C, ces valeurs auront diminué d'au moins 40 % par rapport à ce qu'elles étaient à la température ambiante, ce qui veut dire que la résistance de l'élément d'acier sera à peine suffisante pour supporter les charges imposées (en supposant des coefficients de sécurité ordinaires).

Le rapport masse-périmètre chauffé d'un élément structural en acier est un bon indicateur de sa résistance au feu inhérente. Un poteau d'acier lourd peut absorber une quantité importante de chaleur sans atteindre sa température critique avant 30 à 40 minutes d'exposition à un foyer en pleine combustion. Par contre, les solives en acier ajourées et d'autres types d'éléments en acier légers peuvent subir une défaillance en cinq ou dix minutes si exposés au même feu.

Pour avoir une résistance au feu d'une heure ou plus, un élément d'acier doit normalement être protégé par une enveloppe isolante qui maintiendra sa température en-deçà du point critique. Au début du siècle, on utilisait couramment à cette fin des enceintes en béton, en briques, en carreaux d'argile, en lattis et plâtre, et en d'autres matériaux[1]. De nos jours, des moyens de protection moins coûteux ont été élaborés, tels que les enduits cimentaires et les fibres minérales projetées, qui peuvent être appliqués directement sur les éléments d'acier. Certaines peintures intumescentes et certains enduits époxydiques ont aussi été utilisés pour augmenter la résistance au feu des éléments d'acier. Ces enduits se gonflent et forment une couche isolante autour de l'élément lorsque soumis à la chaleur. Toutefois, ils sont généralement plus coûteux que d'autres types de protection.

Comme solution de rechange aux enceintes et

Figure 4 Effets de l'assujettissement et de la continuité sur la résistance au feu

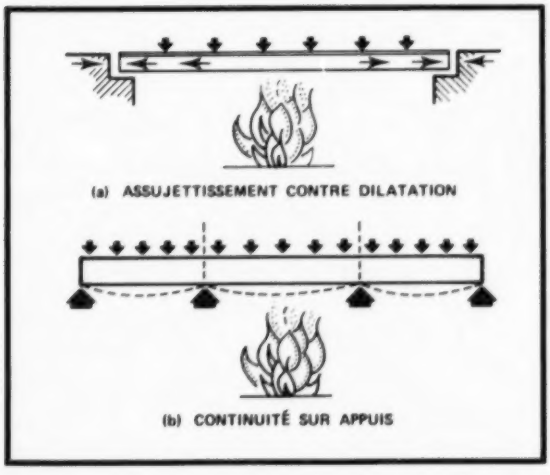
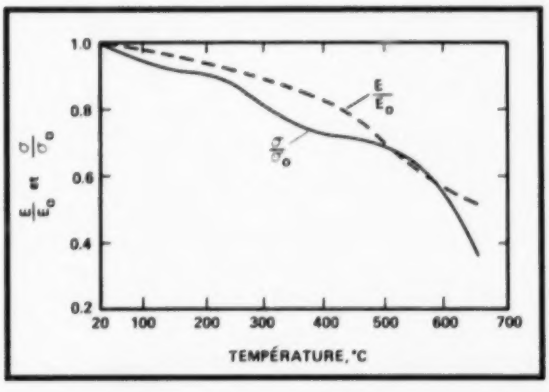


Figure 5 Effets de la température sur le module d'élasticité (E) et le seuil de plasticité (σ) de l'acier A36. E_o et σ_o représentent leurs valeurs dans les conditions ambiantes (tiré du Fire Protection Handbook, 16e édition © 1986 National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269).



aux traitements appliqués sur la surface, il est courant d'utiliser un faux-plafond pour abriter les planchers et toits à ossature d'acier. Le faux-plafond fournit habituellement de 85 à 90 % de la résistance au feu de ces ensembles; le type de faux-plafond, son épaisseur et le mode de fixation utilisé constituent donc les paramètres de conception les plus importants. Les matériaux les plus utilisés pour les faux-plafonds sont le lattis et le plâtre, les plaques de plâtre et les carreaux acoustiques sur treillis métallique. Ils peuvent être fixés directement à la sous-face des éléments d'ossature en acier ou suspendus à ces éléments ou à la dalle de plancher au moyen de crochets de suspension en fil métallique. Cette façon de faire permet une certaine flexibilité dans la hauteur du vide dissimulé, où on loge souvent les installations électriques, mécaniques et de plomberie. Toutefois, pour assurer l'efficacité de ces plafonds protecteurs, il est essentiel que tous les points de pénétration pour le passage de câbles, canalisations, etc. soient adéquatement protégés ou obturés par des coupe-feu et que l'intégrité du faux-plafond ne soit pas détruite lors de travaux d'entretien dans le vide dissimulé. De plus, lorsque des carreaux acoustiques sur treillis métallique sont utilisés, ils doivent normalement être maintenus en place par des agrafes spéciales afin d'éviter qu'ils soient soulevés par la pression produite par un feu.

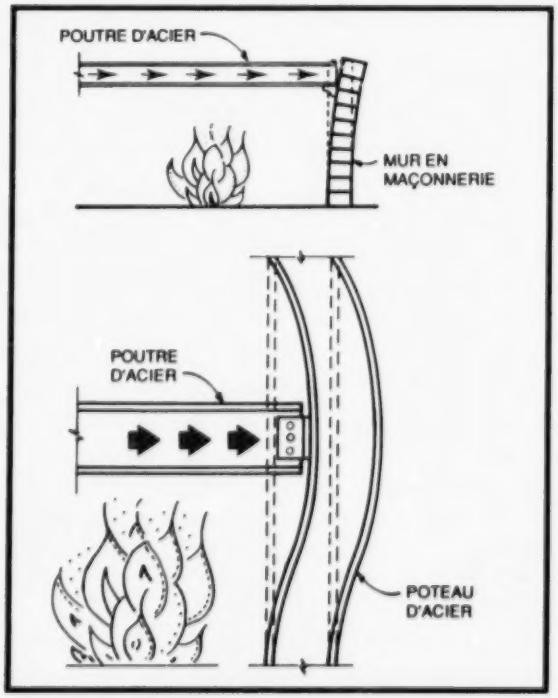
Un dernier aspect à considérer lorsqu'on utilise l'acier dans la construction est son important coefficient de dilatation linéaire qui varie selon la température. Pour des températures d'au plus 1 000 °C, on le détermine comme suit[14] :

$$\alpha = (0.004T + 12) \times 10^{-6}$$

où α = le coefficient de dilatation thermique, en degrés Celsius^{-1},
T = la température en degrés Celsius.

Si l'élément structural est assujetti contre tout déplacement axial (comme dans le cas d'un poteau), la dilatation due à la chaleur se traduira en contraintes thermiques qui viendront accroître le niveau de contraintes global à l'intérieur de l'élément, causant ainsi un effondrement plus rapide. Sans assujettissement axial, un élément d'acier se dilate et peut imposer des charges excentrées aux éléments structuraux contigus en déplaçant l'une de leurs extrémités (par exemple, une poutre déplaçant la partie supérieure d'un poteau ou d'un mur de maçonnerie porteur), comme l'illustre la figure 6. Les règles de l'art de la protection incendie consistent soit à empêcher la dilatation thermique en limitant la température de l'acier, soit à tenir compte de ses effets sur la structure lors de la conception.

Figure 6 Dilatation thermique d'éléments exposés au feu



Construction en bois

Le principal désavantage du bois est sa combustibilité. Quoi qu'il en soit, cela ne veut pas dire que la construction en bois soit moins sûre que la construction en acier ou même en béton. Par exemple, lorsque mis à l'essai sans faux-plafond, un plancher traditionnel à solives de bois peut supporter l'exposition au feu normalisé de la norme CAN4-S101[15] (Méthodes d'essai normalisées de résistance au feu des constructions et des matériaux) pendant au moins quinze minutes, alors qu'un plancher traditionnel à solives d'acier ajourées résisterait moins de dix minutes. La combustion du bois produit à la surface de l'élément une couche carbonisée qui isole le bois non brûlé de la chaleur dégagée par les flammes. Ce phénomène réduit considérablement la vitesse de carbonisation, qui demeure relativement constante pendant toute la durée du feu. La vitesse de carbonisation varie selon l'espèce et la teneur en eau du bois mais se situe à environ 0,6 mm/min pour les éléments épais[12].

De plus, le bois a une très faible conductivité thermique, ce qui veut dire que l'intérieur de la pièce de bois est peu affecté pendant que les faces extérieures brûlent. En fait, il existe une assez bonne corrélation entre la résistance aux charges d'un élément de bois et sa section réduite. On peut supposer que la couche carbonisée n'a aucune résistance alors que le bois non carbonisé ne subit une réduction de résistance que de 10 à 15 %[16].

L'expression "construction en gros bois d'oeuvre" désigne un type de construction combustible constitué de grosses pièces qui peuvent brûler pendant assez longtemps avant que leur section soit suffisamment réduite pour subir l'effondrement. Spécifiant avec soin les dimensions minimales des principaux composants critiques, les codes du bâtiment considèrent souvent la construction en gros bois d'oeuvre comme l'équivalent d'une construction combustible ayant un degré de résistance au feu de trois quarts d'heure.

Comme pour les constructions en acier, les planchers et toits à ossature de bois peuvent acquérir une résistance au feu considérable si les éléments en bois sont protégés par une membrane en lattis et plâtre ou en plaques de plâtre. La membrane peut être fixée directement à l'ossature de bois, à condition que les fixations soient assez longues pour dissiper la chaleur dans le bois et empêcher ainsi une carbonisation locale qui pourrait causer l'arrachement des fixations. Les poteaux de bois peuvent être protégés par des enduits intumescents, des plaques de plâtre ou d'autres panneaux de fibres minérales spécialement conçus à cette fin. Bien que les traitements d'ignifugation (appliqués en surface ou imprégnés sous pression) puissent retarder l'inflammation et ralentir par conséquent la propagation de la flamme sur le bois ignifugé, ils n'ont généralement aucun effet sur la vitesse de carbonisation sous l'effet d'un foyer en pleine combustion et n'augmentent donc pas la résistance au feu des éléments de bois.

Détermination de la résistance au feu

Grâce aux récents travaux effectués dans les établissements de recherche du monde entier, il existe maintenant trois façons de déterminer le degré de résistance au feu des éléments et ensembles structuraux. La méthode qui est de loin la plus courante consiste à effectuer sur un échantillon mis en charge un essai de tenue au feu conforme à une norme nationalement reconnue telle que la norme CAN4-S101 (Méthodes d'essai normalisées de résistance au feu des constructions et des matériaux), ou à simplement consulter les listes de résultats d'essai publiées et à se conformer strictement aux spécifications d'un ensemble éprouvé. La deuxième méthode de conception consiste à utiliser des formules empiriques établissant des corrélations entre les résultats d'essais de tenue au feu pour des combinaisons spécifiques de matériaux de construction et matériaux de protection. En raison du coût élevé des essais en vraie grandeur, un grand nombre de ces formules ont été développées au cours des quinze dernières années afin d'étendre l'utilité des résultats d'essais.

Actuellement, des chercheurs de la Section d'étude du feu de l'Institut de recherche en construction et d'autres établissements développent des approches à fondement théorique, souvent appelées "méthodes de calcul rationnelles", qui utilisent la mécanique structurale et les principes de transfert thermique pour évaluer la réponse des structures dans des conditions d'exposition au feu. Ces méthodes constituent l'approche la plus récente et pavent la voie à tout un éventail de possibilités de calcul.

Nous nous attacherons à expliquer chacune de ces approches et à décrire les forces et les faiblesses de chacune afin d'aider le concepteur à choisir la méthode qui répond le mieux à ses besoins.

Essai de résistance au feu

Depuis le début des années vingt, la méthode traditionnelle utilisée pour déterminer la résistance au feu consiste à faire un essai normalisé de tenue au feu sur un échantillon représentatif de l'ensemble de construction. Des fours ont été conçus pour l'essai des planchers et toits (figure 7), des murs et cloisons (figure 8), et des poteaux structuraux (figure 9). Le four pour poteaux de l'IRC est unique au Canada et est le seul en Amérique du Nord qui soit équipé pour appliquer des charges excentrées aux échantillons.

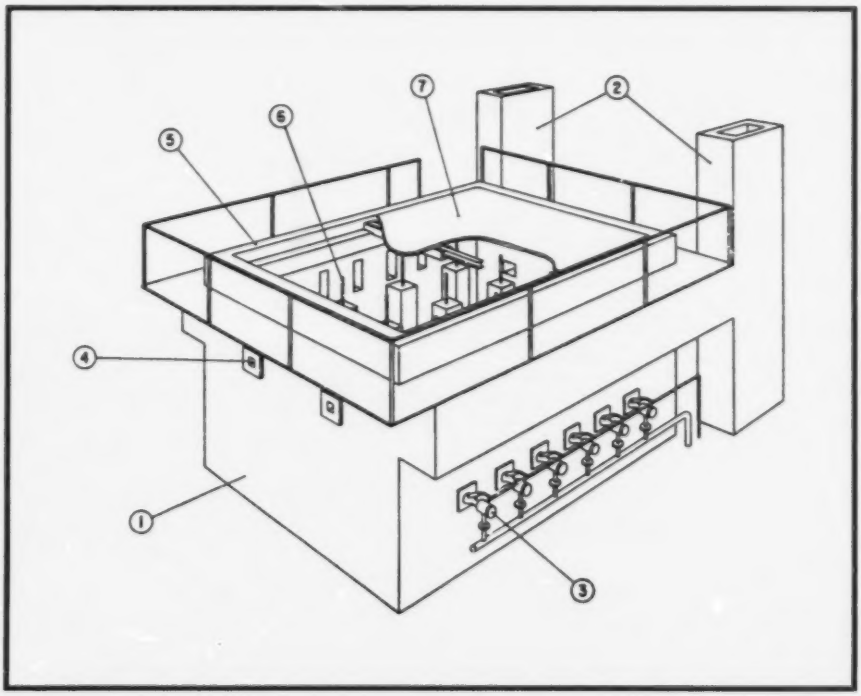
Pour les éléments structuraux, la norme CAN4-S101 exige normalement que l'essai soit fait sous des conditions de pleine charge en service dans la construction, mais la mise à l'essai avec des charges inférieures, qui a généralement pour effet d'augmenter la résistance au feu, est autorisée à condition que cette réduction de la

charge soit clairement indiquée. La norme spécifie en détail la préparation, le conditionnement et l'instrumentation des échantillons d'essai. Le conditionnement aux humidités relatives prescrites est essentiel pour assurer l'exactitude des résultats d'essai, car la teneur en eau de l'échantillon a généralement un effet considérable sur la résistance au feu en raison de la forte capacité d'absorption thermique inhérente au processus de déshydratation. Les conditions d'entrave (ou assujettissement) des extrémités de l'échantillon ont également un effet sur la tenue à l'essai[14]. L'annexe A de la norme CAN4-S101 définit l'entrave thermique comme la condition d'un élément dont la dilatation et la rotation au niveau des appuis est contrée par des forces ou des moments externes à l'élément (généralement par le cadre d'essai). Un échantillon est dit non entravé lorsqu'il est libre de se dilater ou de tourner au niveau de ses appuis, simulant en pratique une structure isostatique. La mise à l'essai avec entrave améliore généralement la résistance au feu d'un ensemble porteur; les résultats de l'essai ne doivent donc être appliqués que dans les cas où les mêmes conditions d'entrave existeront au niveau des appuis de l'ensemble. En cas de doute, l'approche la plus sûre consiste à supposer qu'il n'y aura pas d'entrave et à effectuer l'essai en conséquence.

Il faut comprendre que le degré de résistance au feu est la durée pendant laquelle l'échantillon peut supporter l'exposition au feu normalisée tout en satisfaisant à tous les critères d'essai pertinents. Toutefois, si la fonction d'un élément ou d'un ensemble structural est strictement de supporter les charges et non d'empêcher la propagation du feu, alors le seul critère d'essai applicable est celui de continuer à résister aux charges appliquées (résister à l'effondrement) pendant toute la durée de l'exposition. Dans des conditions réelles, le même élément ou ensemble peut s'effondrer beaucoup plus tôt ou beaucoup plus tard que lors de l'essai en raison des différences entre l'exposition réelle et les conditions d'essai[17], et en raison des différences dans les conditions d'exécution, de charge et d'entrave aux extrémités.

Cette dernière remarque ne veut pas dire que les résultats d'essais sont inutiles. Au contraire, l'approche retenue par les codes, qui consiste à exiger que les essais soient faits dans des condi-

Figure 7 Schéma d'un four pour essai de planchers (tiré de Méthodes d'essai normalisées de résistance au feu des constructions et des matériaux). 1 – four, 2 – collecteur, 3 – brûleurs au gaz, 4 – orifices d'observation, 5 – cadre de retenue, 6 – tubes thermocouples, 7 – échantillon



tions normalisées, a permis d'en arriver à une mesure fiable de la tenue au feu relative des ensembles de construction, dans le contexte d'une réglementation dont l'efficacité repose sur la facilité de mise en application. Malgré ses faiblesses, cette approche a beaucoup contribué à la construction de bâtiments sécuritaires dans nos villes modernes.

Le très grand nombre d'essais effectués a produit une profusion de données sur les caractéristiques de résistance au feu des matériaux et ensembles de construction, données qui sont, dans une large mesure, mises à la disposition des concepteurs. Des listes de résultats d'essais effectués sur des ensembles et éléments brevetés sont distribuées en Amérique du Nord par des organismes d'essai et d'homologation tels que les Laboratoires des assureurs du Canada, les Services professionnels Warnock Hersey Ltée, Factory Mutual Research Corporation et Underwriters Laboratories Inc. De plus, le Supplément du Code national du bâtiment[18] contient une compilation des degrés de résistance au feu applicables à des ensembles génériques. Ces valeurs ont été établies par un comité technique à partir de l'analyse de résultats d'essais.

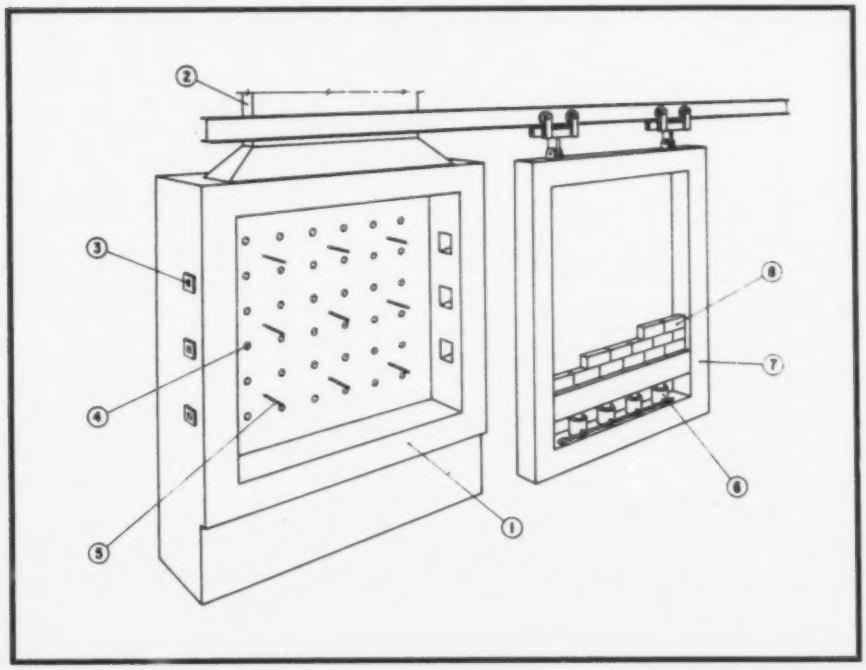
Le principal désavantage de cette approche de conception traditionnelle réside dans le fait que les concepteurs doivent se conformer à chaque détail essentiel des ensembles mis à l'essai pour que le degré de résistance au feu soit applicable dans la construction réelle. Toute modification de la conception nécessite la mise à l'essai d'un nouvel échantillon ou une évaluation technique détaillée de la conception pour démontrer que la modification ne réduira pas le degré de résistance au feu de l'ensemble. Cette situation a beaucoup limité l'innovation dans la conception des structures en incitant les concepteurs à spécifier des ensembles déjà mis à l'essai au lieu de créer de nouveaux ensembles[19].

Méthodes empiriques

Des formules empiriques présentant des corrélations entre des résultats d'essais de tenue au feu et d'importants paramètres de calcul ont commencé à émerger vers la fin des années soixante, lorsqu'on a disposé de suffisamment de données d'essais pour pouvoir quantifier les effets des paramètres critiques. Certaines de ces formules ont été conçues en se fondant sur des prévisions théoriques, elles-mêmes validées par des résultats d'essais.

Les principaux points à considérer pour

Figure 8 Schéma d'un four pour essai de murs (tiré de Méthodes d'essai normalisées de résistance au feu des constructions et des matériaux). 1 – four, 2 – collecteur, 3 – orifices d'observation, 4 – brûleurs au gaz, 5 – tubes thermocouples, 6 – vérins de chargement (au besoin), 7 – cadre de retenue, 8 – échantillon (en construction)

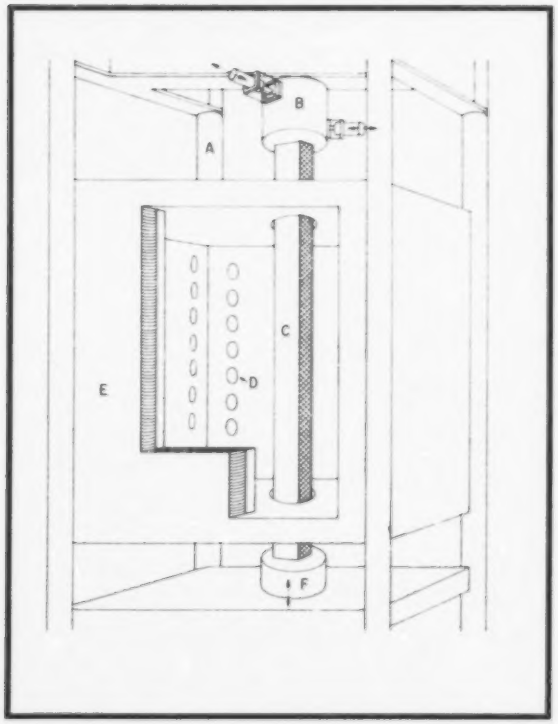


déterminer s'il convient d'utiliser l'une de ces formules sont les suivants :

- l'importance de la base de données utilisée pour valider les relations empiriques,
- le niveau de confiance dans les résultats calculés, et
- l'applicabilité des relations établies aux matériaux et produits utilisés dans la construction réelle.

Une base de données peu étendue limitera considérablement l'utilité de la formule empirique car le concepteur ne disposera que d'une plage limitée de valeurs des paramètres de calcul. L'application des équations à des conditions de calcul se situant à l'extérieur de la plage des résultats d'essais (extrapolation) ne doit pas être entreprise sans une évaluation complète de la sécurité incendie. Le nombre de résultats d'essais utilisés dans l'établissement de la relation empirique doit également être considéré pour évaluer le niveau de fiabilité qu'on peut accorder aux résultats prévus. Le niveau de fiabilité sera bien plus élevé si dix ou vingt résultats ont été utilisés que si la formule est basée sur seulement quatre ou cinq résultats.

Figure 9 Schéma d'un four pour essai de poteaux. A – cadre de retenue, B – tête de chargement transversal, C – poteau d'essai, D – brûleur, E – paroi isolée du four, F – bras de chargement axial



Une analyse statistique des résultats devrait être faite et les prévisions ayant un niveau de fiabilité d'environ 90 % pourraient être utilisées faute d'un meilleur critère. Enfin, il faut prendre soin de s'assurer que les matériaux de construction proposés (tels que les matériaux projetés pour la protection des éléments en acier) sont semblables à ceux mis à l'essai sous tous leurs principaux aspects tels que l'adhérence, la résistance à la fissuration et à l'éclatement, et la conductivité thermique.

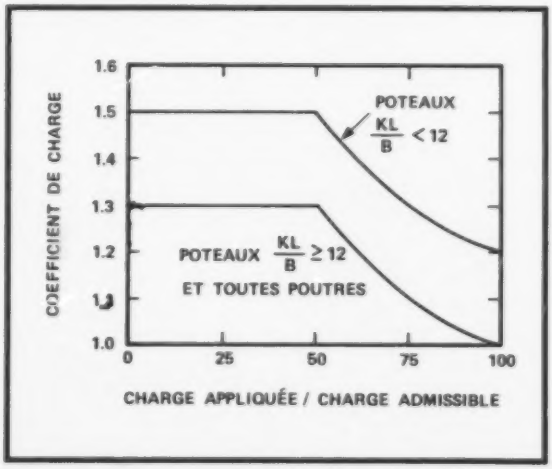
Ces avertissements étant faits, voyons quelques formules empiriques à titre d'illustration.

a) Pour les poutres et poteaux en bois lamellé collé[18,20] :

$$R = 0{,}1\ fB\ \{4 - 2(B/D)\} \quad \text{... poutres exposées sur 4 faces}$$
$$= 0{,}1\ fB\ \{4 - (B/D)\} \quad \text{... poutres exposées sur 3 faces}$$
$$= 0{,}1\ fB\ \{3 - (B/D)\} \quad \text{... poteaux exposés sur 4 faces}$$
$$= 0{,}1\ fB\ \{3 - 1/2(B/D)\} \quad \text{... poteaux exposés sur 3 faces}$$

où R = la résistance au feu, en minutes,
f = le coefficient de charge (voir la figure 10),
B = la plus petite dimension d'une poutre ou d'un poteau, en millimètres,
D = la plus grande dimension d'une poutre ou d'un poteau, en

Figure 10 Coefficient de charge en fonction du rapport d'élancement et du surdimensionnement (tiré du Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1985)



millimètres,
k = le coefficient de longueur de flambement[23],
L = la longueur libre d'un poteau, en millimètres.

Les formules ci-dessus sont basées sur l'hypothèse d'une vitesse de carbonisation de 0,6 mm/min et incluent un coefficient de charge qui donne un certain crédit au surdimensionnement des éléments afin d'obtenir une résistance "de réserve" pendant l'exposition au feu.

b) Pour les poteaux en béton armé[18,22] :

R = (t/75f) - 1 ... béton léger; poteau rectangulaire
= (d/90f) - 1 ... béton léger; poteau circulaire
= (t/100f) - 1 ... béton de masse normale; poteau rectangulaire
= (d/120f) - 1 ... béton de masse normale; poteau circulaire

en supposant que :

c = 25 R si R ≤ 2 heures
= 25 + 12,5 R si R > 2 heures

où R = le degré de résistance au feu, en heures,
t = la plus petite dimension d'un poteau rectangulaire, en millimètres,
d = le diamètre d'un poteau circulaire, en millimètres,
f = le coefficient de charge (voir le tableau 1),
k = le coefficient de longueur de flambement[23],
L = la longueur libre du poteau, en mètres,
p = la section de l'armature d'acier verticale exprimée en pourcentage de la section du poteau,
c = l'épaisseur minimale de recouvrement de béton sur l'armature d'acier verticale, en millimètres.

Ces formules tiennent compte de sept paramètres de calcul: les dimensions et la forme du poteau, sa longueur de flambement, le type de béton, le pourcentage d'armature, l'épaisseur du recouvrement de béton sur l'armature et le surdimensionnement. La longueur de flambement du poteau affecte sa résistance au feu car les poteaux "courts" subissent une défaillance par fissuration du béton (défaillance sous compression), tandis que les poteaux plus longs subissent un flambage latéral excessif; différentes propriétés mécaniques régissent chaque mode de défaillance. Le type de granulat utilisé dans le béton léger (l'argile, le schiste et le laitier expansés, par exemple) est supérieur au granulat utilisé dans le béton de masse moyenne lors d'une exposition à des températures élevées. Il en découle que le béton léger conserve davantage de sa résistance et a un coefficient de conductivité thermique inférieur.

On considère que les poteaux dont l'armature est importante (p > 3 %) sont plus résistants parce qu'ils sont légèrement plus stables lorsqu'exposés au feu. Cet avantage est indépendant du degré de surdimensionnement (ou coefficient de sécurité supplémentaire), qui ajoute également à la résistance au feu d'un poteau. Enfin, l'épaisseur du recouvrement de béton détermine le taux auquel la chaleur sera transmise par conduction à l'armature principale, tel qu'il est mentionné précédemment.

c) Pour les poutres et poteaux d'acier protégés[24,25] :

Tableau 1 Coefficient de charge pour des poteaux en béton armé

Coefficient de sécurité supplémentaire*	Coefficient de charge f		
		3,7 m < kL ≤ 7,3 m	
	kL ≤ 3,7 m	t ≤ 300 mm et p ≤ 3 %	tous les autres cas
1,00	1,0	1,2	1,0
1,25	0,9	1,1	0,9
1,50	0,8	1,0	0,8

* Le coefficient de sécurité supplémentaire est le rapport de la capacité portante théorique du poteau à la résistance exigée pour supporter les charges prévues déterminées en conformité avec la norme CAN3-A23.3[23].

$$R = [C_1 (M/D) + C_2]\, t$$

où R = la résistance au feu, en minutes,

M = la masse de l'élément d'acier, en kilogrammes par mètre,

D = le périmètre chauffé de l'élément, en millimètres,

t = l'épaisseur du matériau isolant, en millimètres,

C_1, C_2 = des constantes empiriques pour le matériau isolant (voir le tableau 2).

Comme nous l'avons vu précédemment, le rapport masse–périmètre chauffé du poteau d'acier est un paramètre de conception important pour la résistance au feu. Plus la masse est grande, plus la capacité thermique volumique est grande; en d'autres mots, plus il faut de chaleur pour augmenter la température moyenne du poteau. Le périmètre chauffé (D) fournit une mesure du flux thermique global atteignant l'élément d'acier. La figure 11 contient des approximations types de D en fonction des dimensions du poteau pour différentes formes de poteaux et pour différents types de protection.

Méthode du calcul théorique

Au cours des dernières années, un grand nombre de travaux de recherche ont été entrepris en vue de développer des méthodes analytiques pour le calcul de la résistance au feu des éléments et ensembles structuraux. On est en train de valider, à l'aide de résultats d'essais, certaines méthodes de calcul pour des poteaux et dalles de plancher en béton armé, pour des poutres et poteaux en acier protégés extérieurement par des matériaux inorganiques projetés ou par des parois de plaques de plâtre, et pour des poteaux d'acier creux protégés intérieurement par de l'eau ou par du béton ordinaire ou armé. La

Figure 11 Périmètres exposés à la chaleur présumés pour différentes formes de poteaux et différents types de protection

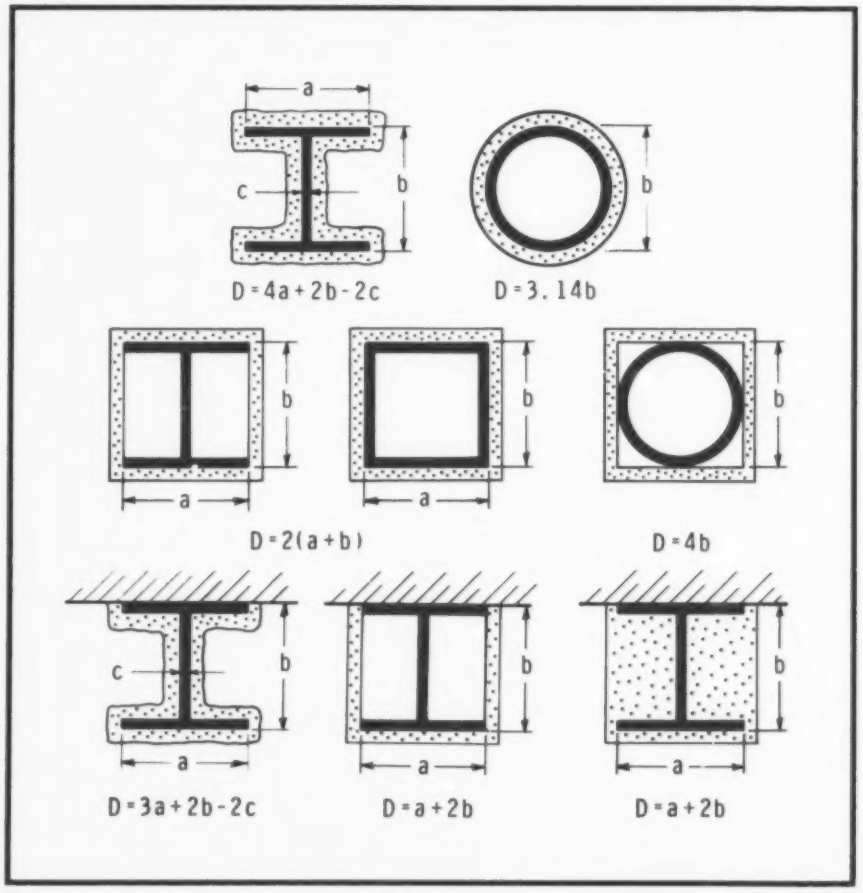


Tableau 2 Constantes empiriques pour deux types de matériaux isolants pour l'acier

Matériau isolant	Plage de masses volumiques ρ (kg/m^3)	C_1*	C_2
Fibres minérales, vermiculite et perlite	32 à 80	806/ρ	1,17
Matériaux cimentaires	32 à 80	806/ρ	2,81

*La valeur de C_1 dépend de la masse volumique réelle (ρ) du matériau isolant.

plupart des méthodes de calcul se limitent présentement à des cas relativement simples tels que charges concentriques, articulation aux extrémités ou conditions d'appui isostatique, mais des travaux expérimentaux sont en cours afin d'étendre la validité des algorithmes de prévision à un plus vaste éventail de situations, y compris les extrémités fixes ou partiellement fixes ou les charges excentrées.

La plupart des méthodes de calcul rationnelles consistent à appliquer les principes habituels de mécanique structurale en tenant compte de l'effet des températures élevées sur les propriétés thermiques et mécaniques des principaux matériaux de construction. Par conséquent, tout le problème de la conception en fonction de la résistance au feu peut être subdivisé en trois éléments :

- caractérisation de l'intensité prévue du feu,
- détermination de la transmission thermique aux éléments de construction,
- évaluation des caractéristiques de résistance et de déformation des éléments structuraux.

Bien que nous analyserons chacun de ces trois éléments du calcul séparément, il faut se rappeler que certaines structures (les ensembles en bois, par exemple) réagissent au feu et qu'il faut donc tenir compte de l'interdépendance de ces trois éléments. Cela se fait généralement par calculs itératifs.

Intensité du feu

De tous les aspects du calcul de la résistance au feu, la prévision et la caractérisation adéquates de l'intensité du feu susceptible de survenir dans une zone donnée d'un bâtiment est l'aspect pour lequel le concepteur est le moins bien préparé. Le feu est un phénomène complexe et sa compréhension nécessite une connaissance de la cinétique chimique, de la mécanique des fluides, du transfert de chaleur et de la thermodynamique. On ne peut raisonnablement demander aux concepteurs d'acquérir une connaissance approfondie de tous ces domaines.

Deux possibilités s'offrent au concepteur. La première consiste à se fier à la validité et à l'exactitude des modèles de développement des feux de compartiment avant et après l'embrasement général réalisés par des chercheurs. Malheureusement, la modélisation du feu avant l'embrasement général n'est pas très avancée; on ne dispose donc que de grandes hypothèses pour ce qui est des effets produits par le préchauffage pendant les premiers stades d'un feu sur la tenue des éléments structuraux. Par contre, la modélisation du feu après l'embrasement général est considérablement plus perfectionnée; certaines hypothèses de simplification ne modifiant pas beaucoup l'exactitude des résultats ont été introduites[26].

Une assez bonne correspondance entre les résultats théoriques et expérimentaux semble réalisable grâce à certains modèles dans certaines conditions bien définies de quantité et de type de charge combustible, d'ouvertures pour la ventilation et de caractéristiques thermiques des matériaux de revêtement intérieur de la pièce[27]. Toutefois, le peu de contrôle qu'a le concepteur sur certains de ces paramètres fait qu'il doit les choisir avec soin afin de prévoir les pires conditions susceptibles de survenir pendant la vie utile du bâtiment. Cette tâche n'est pas facile, en particulier dans le cas d'un bâtiment qui n'existe encore que sur papier.

La seconde possibilité offerte aux concepteurs est d'utiliser une description numérique des conditions d'exposition à la chaleur lors d'un essai de tenue au feu normalisé au lieu d'une description de l'intensité prévue lors d'un feu réel. Il est évident que cette méthode n'est pas idéale car un feu réel peut suivre une courbe temps–température assez différente de celle

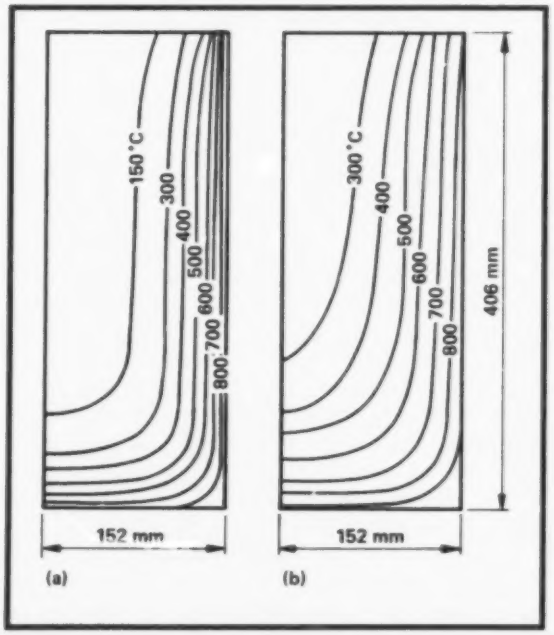
présentée dans la norme[7]. Quoi qu'il en soit, cette approche permet de prédire le degré de résistance au feu qu'un ensemble structural offrirait s'il était soumis à l'essai normalisé, ce qui constitue une mesure de tenue bien reconnue par les autorités.

Analyse de la transmission de chaleur

Disposant d'une caractérisation satisfaisante de l'exposition à la chaleur, le concepteur peut ensuite calculer à quelle vitesse les températures augmenteront en différentes parties de l'élément structural. Des isothermes ou profils de température peuvent être tracés pour donner une image instantanée de la répartition des températures à l'intérieur de l'élément à tout moment au cours du feu (figure 12)[28].

Pour ces calculs, le concepteur peut se servir de logiciels spécialement conçus à cette fin. Par exemple, FIRES-T3 et TASEF-2 sont deux programmes informatiques permettant de calculer le tranfert thermique des feux aux structures[29,30]. Tous deux utilisent la méthode de calcul aux éléments finis, l'un en deux dimensions (TASEF-2), l'autre en trois dimensions (FIRES-T3). D'autres programmes informatiques ont aussi été développés à partir d'une technique numérique de différences finies[31]. Le principal obstacle à l'analyse de la transmission de chaleur est l'insuffisance de connaissance des variations des propriétés des matériaux en fonction des températures. Une assez grande exactitude est tout de même réalisable dans des cas simples, où l'élément structural est relativement homogène (l'acier, par exemple).

Figure 12 Isothermes typiques pour une poutre en béton de masse ordinaire (304 × 406 mm) après une exposition au feu normalisée de a) 1 heure et b) 3 heures (tiré de Gustaferro et Lin, 1986)



Bien que certains logiciels puissent simuler différentes conditions d'exposition au feu, il est plus courant d'utiliser la courbe temps–température normalisée pour décrire l'exposition au feu, encore une fois pour obtenir une mesure de tenue facilement reconnaissable. Normalement, cela nécessite l'utilisation des critères de températures limites spécifiés dans la norme comme critères de défaillance déterminant la résistance au feu de l'ensemble.

Réponse structurale à des températures élevées

En utilisant les informations obtenues par l'analyse de la transmission thermique et celles contenues dans les bases de données disponibles sur les propriétés des matériaux, un concepteur peut dresser un tableau des caractéristiques de résistance et de déformation de l'élément structural à tout moment de l'exposition au feu. La première phase des analyses de contraintes, de stabilité et de déformations consiste généralement à utiliser un programme de calcul aux éléments finis pour définir le continuum par des éléments plus petits et interdépendants (particulièrement si la forme de l'élément structural n'est pas symétrique) et pour tenir compte de la répartition non uniforme des températures à l'intérieur de l'élément (comme à la figure 13)[14]. Pour chaque élément, la déformation croissante causée par l'augmentation de température est calculée et un nouveau niveau de contraintes est déterminé à l'aide de la relation contraintes-déformations pour la température en question. Enfin, les principes habituels de mécanique peuvent être utilisés pour calculer la résistance résiduelle de l'élément aux charges, au cisaillement ou aux moments, qui peut ensuite être comparée à la charge appliquée prévue (forces et moments de cisaillement) pour déterminer si la défaillance est imminente.

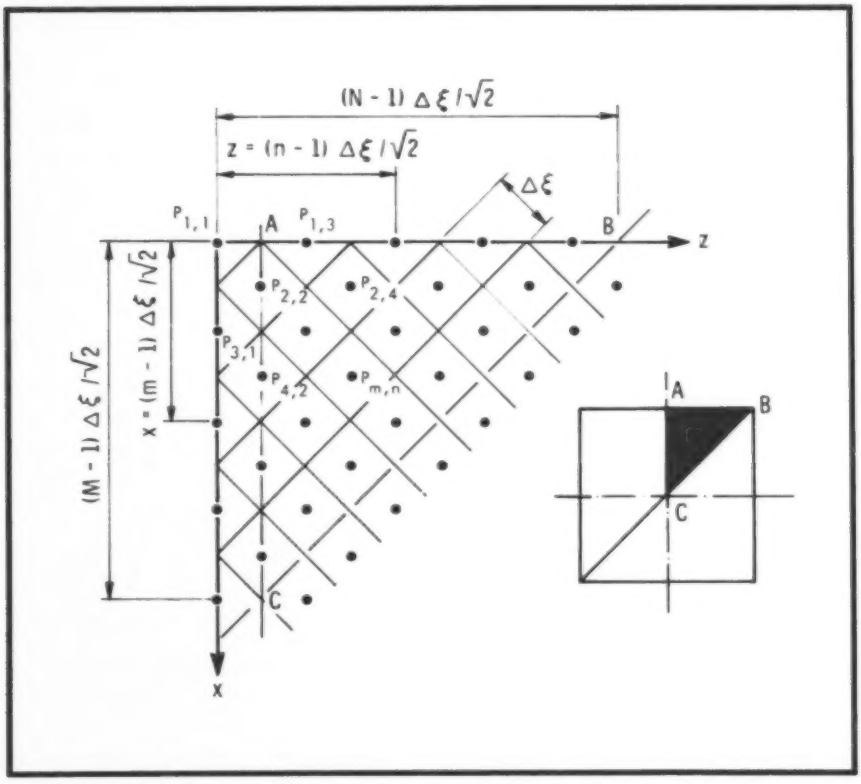
La liste de références et la bibliographie du présent ouvrage donnent une liste de documents décrivant certaines des méthodes de calcul

disponibles permettant de prédire la résistance au feu des éléments et ensembles structuraux[14,31]. Cette liste est loin d'être exhaustive étant donné le niveau élevé d'activité dans ce domaine de recherche autour du globe. Il est fortement recommandé au lecteur, avant d'appliquer un modèle de calcul à un projet précis, de se procurer un exemplaire du document technique décrivant l'élaboration de l'outil de prévision et d'analyser les hypothèses posées ainsi que l'étendue de la validation par des essais. Il s'assurera ainsi que le modèle est valable pour les conditions de calcul et qu'il pourra suffisamment se fier aux prévisions calculées pour justifier une abstention aux essais en vraie grandeur.

Le plus gros problème d'utilisation de l'approche théorique est qu'elle nécessite l'accès à une bonne base de données sur les propriétés des matériaux soumis à des températures élevées. Une bonne connaissance des propriétés thermiques et mécaniques en fonction de la température est essentielle à l'exactitude du modèle de calcul.

Par exemple, les principales propriétés mécaniques pour un élément en acier est la limite élastique, la résistance à la rupture, le module d'élasticité, la limite de proportionnalité et le fluage. La figure 14 donne une indication de la variabilité des quatre premières de ces propriétés en fonction de la température pour un acier de construction souple[15]. Les variations de la limite élastique et de la résistance à la rupture de l'acier de précontrainte étiré à froid sont encore plus importantes (figure 15)[11]. La vitesse de fluage en fonction de la température d'un acier de construction souple soumis à une contrainte de 1 500 kg/cm^2 est illustrée à la figure 16[11]. D'autres données sur les effets de la température sur les propriétés thermiques et mécaniques d'autres matériaux peuvent être obtenues[32] mais, en général, les bases de données sont incomplètes. Plus on disposera de mesures à des températures élevées pour différents matériaux de construction, plus cette méthode de calcul prendra de l'ampleur en pratique.

Figure 13 Discrétisation d'une section de un huitième d'un poteau en béton armé en un réseau d'éléments (tiré de Lie et al., Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns)



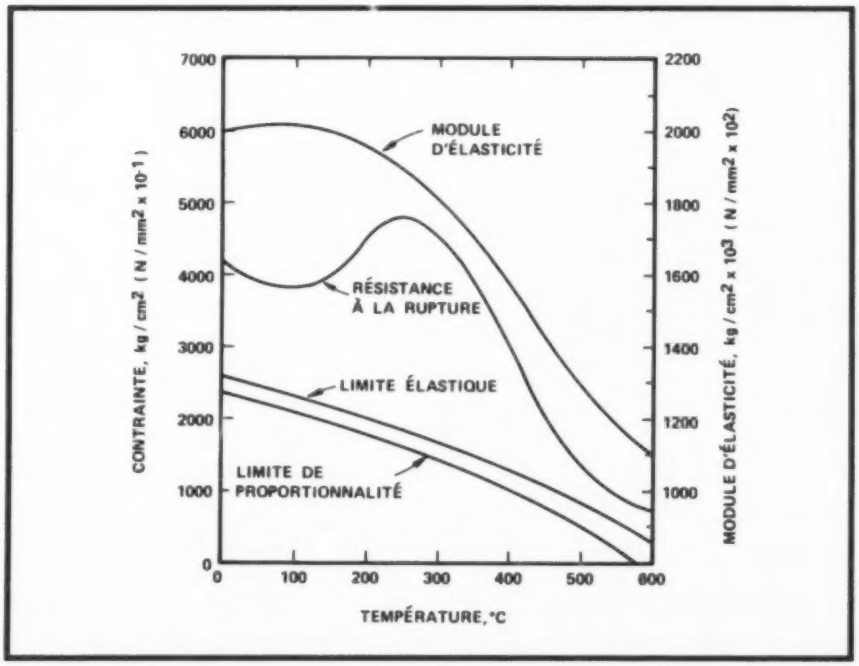
Conclusions

L'avènement, au début du siècle, de bâtiments plus élevés a engendré le besoin de s'assurer que ces structures ne s'effondreraient pas prématurément, voire même pas du tout, par suite d'un incendie. Un effondrement est considéré prématuré s'il survient avant que les objectifs de sécurité des personnes et de protection des propriétés n'aient été atteints. Pour ce qui est de la sécurité des personnes, le concepteur doit s'assurer que l'effondrement des principaux éléments structuraux ne surviendra pas avant que les occupants n'aient eu un temps raisonnable pour se rendre en lieu sûr. Dans le cas des bâtiments de grande hauteur, il ne doit pas y avoir d'effondrement du tout puisque des aires de refuge sont souvent prévues à l'intérieur du bâtiment. La sécurité des pompiers doit être assurée car ils sont appelés à entrer dans le bâtiment pour sauver des vies.

La capacité d'un élément structural de résister à l'effondrement (sa résistance au feu) dépend principalement du comportement de ses composants à des températures élevées. Les matériaux organiques brûlent alors que les matériaux inorganiques perdent graduellement leur résistance ou s'allongent jusqu'à ce que l'élément ne parvienne plus à soutenir les charges imposées. La résistance au feu peut être assurée soit par un surdimensionnement des éléments de façon qu'ils aient une résistance de réserve pour soutenir les charges, soit en protégeant les éléments contre la chaleur au moyen de matériaux alliant une faible conductivité thermique à de bonnes caractéristiques de "tenue en place".

La mesure ou l'évaluation de la résistance au feu se fait traditionnellement en soumettant un échantillon représentatif à un essai normalisé de tenue au feu. Bien que cette technique ait fourni aux autorités compétentes un mode de classement utile et ait élargi nos connaissances sur la tenue au feu de différents systèmes structuraux, son coût a été un obstacle important à l'innovation dans la conception. Au cours des vingt dernières années, des méthodes de calcul empiriques et théoriques, constituant des solutions de remplacement économiques aux essais, ont été développées. Avant de tirer avantage de ces nouveaux outils de conception, l'utilisateur devrait toutefois comprendre à fond les hypothèses et les limites de la méthode afin de s'assurer que les prévisions sont réellement applicables aux conditions de conception considérées.

Figure 14 Caractéristiques de résistance et de déformation d'un acier de construction souple (St37) en fonction de la température (tiré de Lie, Fire and Buildings)



Références

1. Department of Commerce Building Code Committee, 1931. Recommended Minimum Requirements for Fire Resistance in Buildings, U.S. Department of Commerce, Building and Housing Report No. 14, Bureau of Standards, Washington, DC, 58 p.

2. Subcommittee on Fire-Resistance Classification of the Central Housing Committee on Research, Design and Construction, 1942. Building Materials and Structures, U.S. Department of Commerce, Report BMS92, National Bureau of Standards, Washington, DC, 70 p.

3. Shoub, H., 1961. *Early history of fire endurance testing in the United States*, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 301 on Fire Test Methods, Philadelphie, PA, pp. 1-9.

4. Robertson, A.F. et D. Gross, 1970. *Fire load, fire severity and fire endurance*, American Society for Testing and Materials, STP 464 on Fire Test Performance, Philadelphie, PA, pp. 3-29.

5. Ingberg, S.H., 1928. *Test of the severity of building fires*, NFPA Quarterly, vol. 22, n° 1, pp. 43-61.

6. Mehaffey, J.R., 1987. *Inflammabilité des matériaux de construction et développement du feu*, Compte rendu du Regard 87 sur la science du bâtiment, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 28277F, pp. 25-39.

7. Gosselin, G.C., 1987. *Compartimentation et résistance au feu*, Compte rendu du Regard 87 sur la science du bâtiment, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 28277F, pp. 41-51.

8. Côté, A.E. et J.L. Linville (dir. de publ.), 1986. Fire Protection Handbook, 16e édition, Systems Concepts for Building Firesafety, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 7-10 à 7-19.

9. Code national du bâtiment du Canada 1985. Comité associé du Code national du bâtiment, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 23174F, 487 p.

10. Malhotra, H.L., 1956. *The effect of temperature on the compressive strength of concrete*, Magazine of Concrete Research,

Figure 15 Résistance à la rupture et limite élastique d'un acier de précontrainte étiré à froid (ASTM A421) en fonction de la température (tiré de Harmathy et Stanzack, 1970)

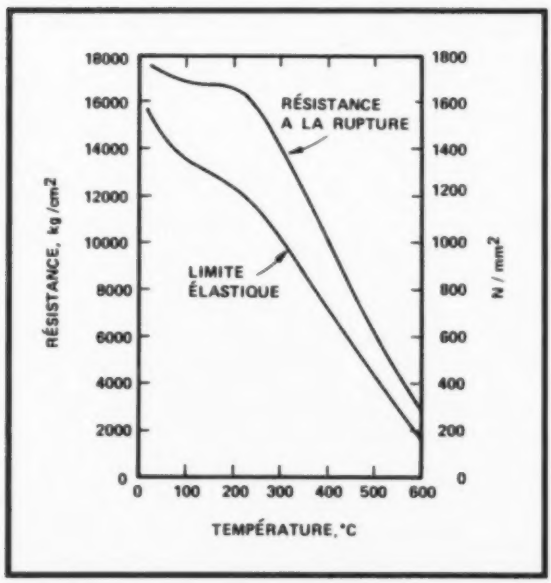
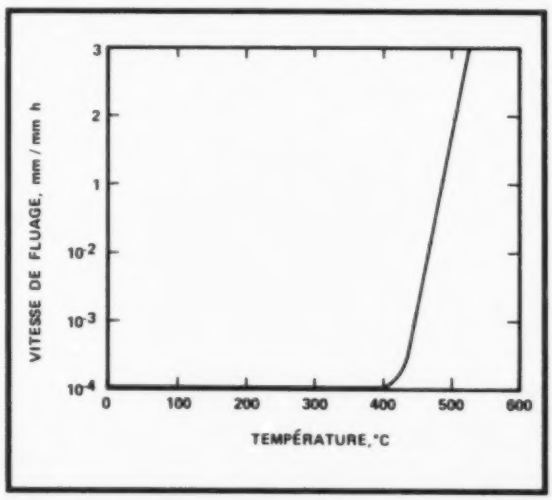


Figure 16 Vitesse de fluage d'un acier de construction souple (ASTM A36) en fonction de la température (tiré de Lie, Fire and Buildings)



vol. 8, n° 23, pp. 85-94.

11. Harmathy, T.Z. et W.W. Stanzak, 1970. *Elevated temperature tensile and creep properties of some structural and prestressing steels*, American Society for Testing and Materials, STP 464 on Fire Test Performance, Philadelphie, PA, pp. 186-208.

12. Côté, A.E. et J.L. Linville (dir. de publ.), 1986. Fire Protection Handbook, 16e édition, Fire Safety in Building Design and Construction, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 7-82 à 7-108.

13. Reinforced Concrete Fire Resistance, 1980. Concrete Reinforcing Steel Institute, Chicago, IL, 242 p.

14. Lie, T.T., T.D. Lin, D.E. Allen et M.S. Abrams, 1984. *Fire resistance of reinforced concrete columns*, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Technical Paper No. 1167, Ottawa, NRCC 23065, 32 p.

15. Méthodes d'essai normalisées de résistance au feu des constructions et des matériaux, 1982. Laboratoires des assureurs du Canada, norme ULC CAN4-S101, Scarborough, Ontario, 41 p.

16. Lie, T.T., 1972. Fire and Buildings. Applied Science Publishers Ltd., Essex, Angleterre, 276 p.

17. Harmathy, T.Z. et T.T. Lie, 1970. *Fire test standard in the light of fire research*, American Society for Testing and Materials, STP 464 on Fire Test Performance, Philadelphie, PA, pp. 85-97.

18. Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1985, Comité associé du Code national du bâtiment du Canada, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, CNRC 23178F, 290 p.

19. Gosselin, G.C. et T.T. Lie, 1987. *Provision of fire resistance-evolution of design approaches*, Compte rendu de la conférence du centenaire de la Société canadienne de génie civil, Montréal, Québec, vol. 1, pp. 3-19.

20. Lie, T.T., 1977. *A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 4, n° 2, NRCC 15946, pp. 161-169.

21. Règles de calcul des charpentes en bois, 1984. Association canadienne de normalisation, norme ACNOR CAN3-O86, Rexdale, Ontario, 206 p.

22. Lie, T.T. et D.E. Allen, 1972. *Calculation of the fire resistance of reinforced concrete columns*, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Technical Paper No. 378, Ottawa, NRCC 12797, 25 p.

23. Règles de calcul des ouvrages en béton dans les bâtiments, 1984. Association canadienne de normalisation, norme ACNOR CAN3-A23.3, Rexdale, Ontario, 298 p.

24. Lie, T.T. et W.W. Stanzak, 1973. *Fire resistance of protected steel columns*, Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, vol. 10, n° 3, NRCC 13516, pp. 82-94.

25. Designing Fire Protection for Steel Columns, 1980. American Iron and Steel Institute, 3e édition, Washington, DC, 25 p.

26. Harmathy, T.Z. et J.R. Mehaffey, 1983. *Post-flashover compartment fires*, Fire and Materials, vol. 7, n° 2, NRCC 22571, pp. 49-61.

27. Mehaffey, J.R. et T.Z. Harmathy, 1985. *Thermal response of compartment boundaries to fire*, Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, NRCC 25920, pp. 111-118.

28. Gustaferro, A.H. et T.D. Lin, 1986. *Rational design of reinforced concrete members for fire resistance*, Fire Safety Journal, vol. 11, pp. 85-98.

29. Iding, R., B. Bresler et Z. Nazamuddin, 1977. *FIRES-T3 – A computer program for the fire response of structures – thermal*, University of California, Berkeley, Report No. UCB FRG 77-15.

30. Wickström, U., 1979. *TASEF-2, A computer program for temperature analysis of structures exposed to fire*, Lund Institute of

Technology, Suède, Report No. 79-2.

31. Lie, T.T., 1984. *A procedure to calculate fire resistance of structural members,* Fire and Materials, vol. 8, n° 1, NRCC 23574, pp. 44-48.

32. Harmathy, T.Z., 1983. *Properties of building materials at elevated temperatures,* Division of Building Research, National Research Council of Canada, Paper No. 1080, Ottawa, NRCC 20956, 74 p.

Bibliographie

Résultats d'essais de structures brevetées

Approval Guide 1985. Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, 535 p.

Fire Laboratories Listings, 1986. Services professionnels Warnock Hersey Ltée, Coquitlam, B.C., 339 p.

Fire Resistance Directory, 1986. Underwriters Laboratories Incorporated, Northbrook, IL, 750 p.

List of Equipment and Materials, 1986. Volume II Building Construction, Laboratoires des assureurs du Canada, Scarborough, Ontario, 709 p.

Méthodes de calcul pour la prédiction de la résistance au feu

Barthélémy, B. et J. Kruppa, 1978. Résistance au feu des structures béton-acier-bois, Édition Eyrolles, Paris, 277 p.

Bresler, B., 1985. *Analytical prediction of structural response to fire,* Fire Safety Journal, vol. 9, pp. 103-117.

Byrne, S.M., 1979. *Fire resistance of load-bearing masonry walls*, Fire Technology, vol. 15, n° 3, pp. 180-188.

European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures, 1983. European Convention for Constructional Steelwork, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 106 p.

Grandjean, G. et C. Lelong, 1977. *Tenue au feu de profils creux carrés remplis de béton,* Construction métallique, n° 80, pp. 90-116.

Gustaferro, A.H., L.D. Martin et D. Leslie, 1977. PCI Design for Fire Resistance of Precast Prestressed Concrete, Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 81 p.

Jeanes, D.C., 1985. *Computer modeling the fire endurance of floor systems in steel-framed buildings*, Fire Safety: Science and Engineering, American Society for Testing and Materials, STP 882, Philadelphie, PA, pp. 223-238.

Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier, 1980. Centre scientifique et technique du bâtiment, Document technique unifié, Paris, 56 p.

Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton, 1980. Centre scientifique et technique du bâtiment, Document technique unifié, Paris, pp. 43-61.

Pettersson, O., 1976. *Theoretical design of fire-exposed structures,* Lund Institute of Technology, Bulletin 51, Suède, 34 p.

Pettersson, O., S.E. Magnusson et J. Thor, 1976. *Fire engineering design of steel structures,* Swedish Institute of Steel Construction, Publication No. 50, Stockholm, 232 p.

Rudolph, K.E., E. Richter, R. Hass et U. Quast, 1986. *Principles for calculation of load-bearing and deformation behaviour of composite structural elements under fire action,* Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., pp. 301-310.